

Informe sobre la estabilidad de la Lonja de Palma de Mallorca

por:

Santiago Huerta Fernández
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Govern de les Illes Balears
Conselleria d'Educació i Cultura

Madrid, agosto de 2008

Índice

Introducción: Objetivo del informe	1
1. Marco teórico	5
1.1 El material: hipótesis del análisis límite	5
1.2 Condición de estabilidad; seguridad	5
1.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad	6
1.4 Movimientos y grietas	6
1.5 Verificación de la resistencia	7
2. Breve descripción constructiva	8
2.1 Bóvedas	8
2.2 Pilares	11
2.3 Muros	11
2.4 Torres	12
3. Estado actual: agrietamientos y desplomes	13
3.1 Muros	13
3.2 Bóvedas	14
4. Análisis de estabilidad	15
4.1 Las reglas estructurales del gótico	16
4.2 Forma general de las bóvedas	17
4.3 Sobre el análisis de las bóvedas de crucería	18
4.3 Cálculo del empuje de la bóveda	20
4.4 Estabilidad del sistema de contrarresto	26
5. Desmontaje del tejado añadido	28
6. Conclusiones	29
7. Bibliografía	30
8. Láminas	33

Introducción: Objetivo del informe

El presente informe tiene por objetivo estudiar la estabilidad de la Lonja de Palma de Mallorca. Su necesidad nace de estudios anteriores (Ministerio de Fomento 2000) en los que se concluía que la Lonja estaba en la actualidad en un estado precario. No pretende este escrito discutir en detalle los argumentos de los citados estudios, sino más bien explicar el hecho incuestionable de la supervivencia de la Lonja, en excelente estado, durante más de 500 años desde su terminación.

El informe está dividido en las siguientes partes:

- 1) *Marco teórico.* Se exponen las hipótesis fundamentales realizadas en los cálculos y se indica el contexto científico dentro del que se inscribe el estudio.
- 2) *Breve descripción constructiva.* Se detalla brevemente la forma y disposición de los elementos fundamentales (bóvedas, muros, torres, etc.) y se comenta su forma probable de construcción, por referencia a estudios de edificaciones coetáneas.
- 3) *Estado actual: agrietamientos y desplomes.* Se describe la situación actual del edificio indicando los agrietamientos visibles y los desplomes medidos en los muros de contrarresto perimetrales.
- 4) *Análisis de estabilidad.* Se analiza el estado de equilibrio de la Lonja según el marco teórico elegido y teniendo en cuenta el tipo de construcción y los movimientos observados (apartados 1) á 3)). El análisis de estabilidad se realiza en su estado original y tras la adición de la cubierta.
- 5) *Desmontaje de la cubierta añadida.* Se estudia el efecto de retirar la cubierta añadida, para recuperar la cubierta original de losas de marés recubiertas de *trespol* y, en su caso, el proceso a seguir en el desmontaje.
- 6) *Conclusiones.* Se resumen los resultados fundamentales del estudio.

Para su elaboración se han contado con la información suministrada por el arquitecto D. Pedro Rabassa. Para las medidas se ha utilizado el levantamiento planimétrico de la arquitecta Gloria Alcázar (Ministerio de Fomento 2000), figuras 1 á 3. Los desplomes y medidas adicionales han sido realizadas por Dña. Ana López Mozo, profesora de la ETSAM.

Aunque se trata de un informe técnico, ha sido preciso realizar un estudio de la documentación histórica referente al edificio. Los libros y artículos consultados figuran en la Bibliografía final. En el texto se citan entre paréntesis siguiendo el formato autor-año de publicación.

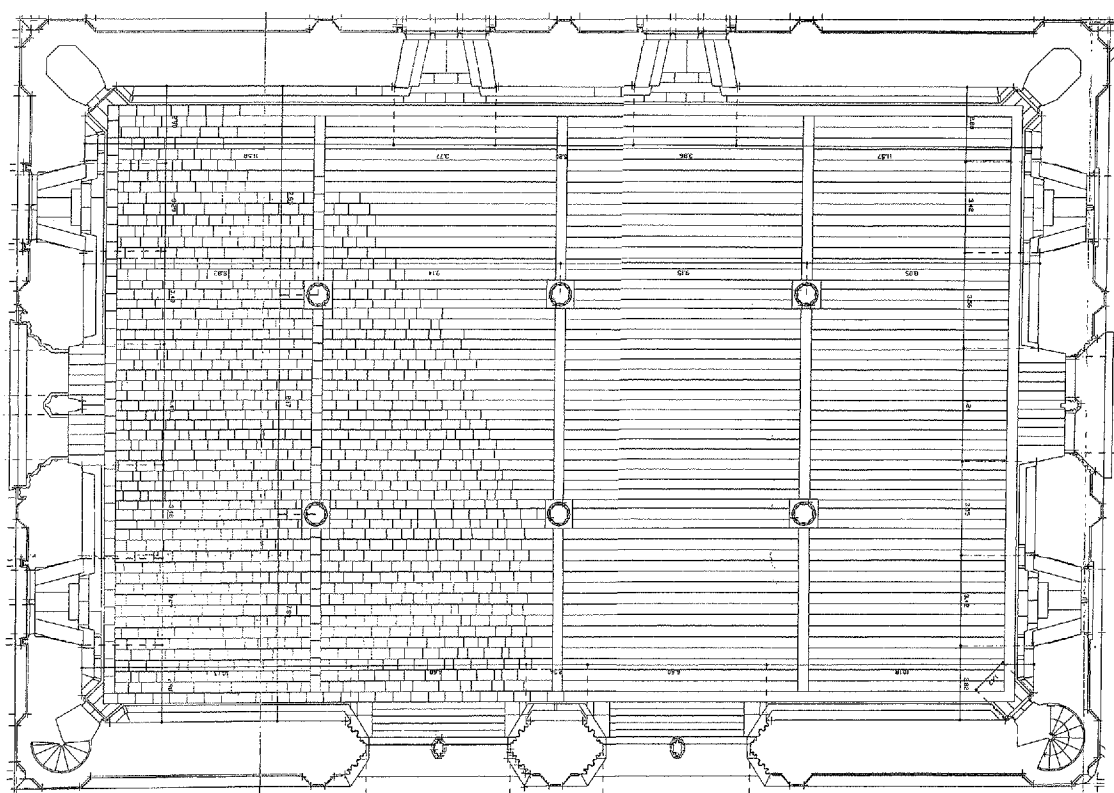
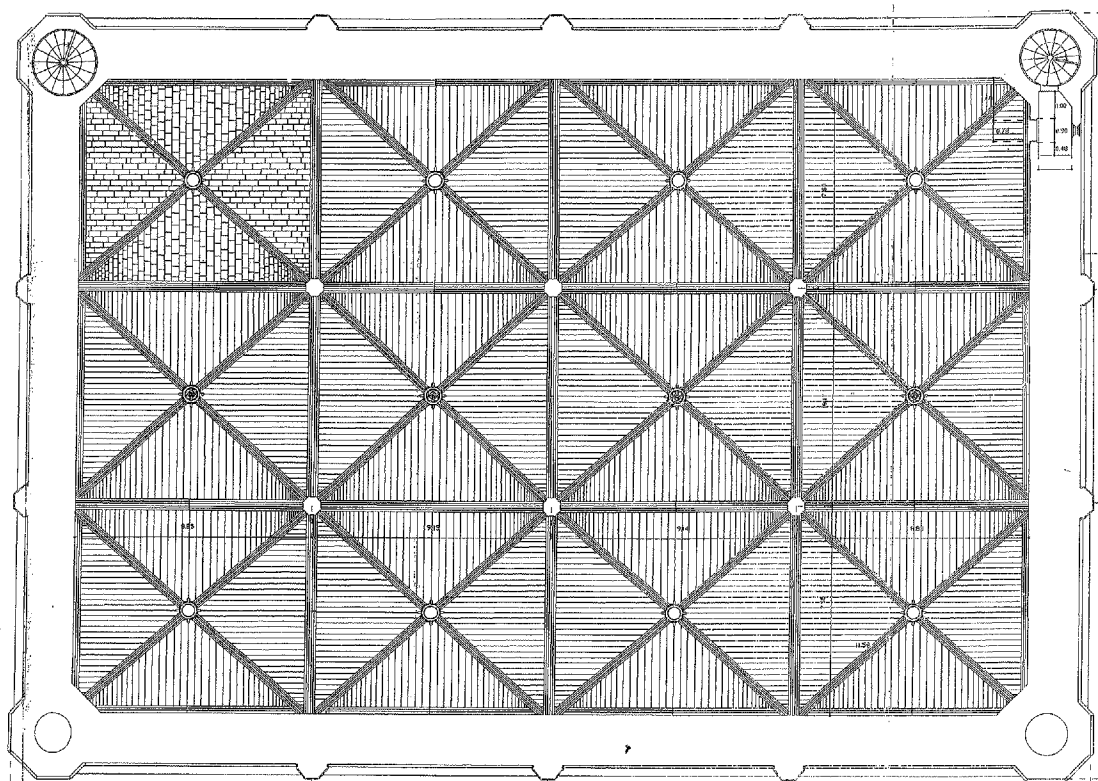


Figura 1

Planta a nivel de suelo y planta de bóvedas (G. Alcázar. Ministerio de Fomento 2000)

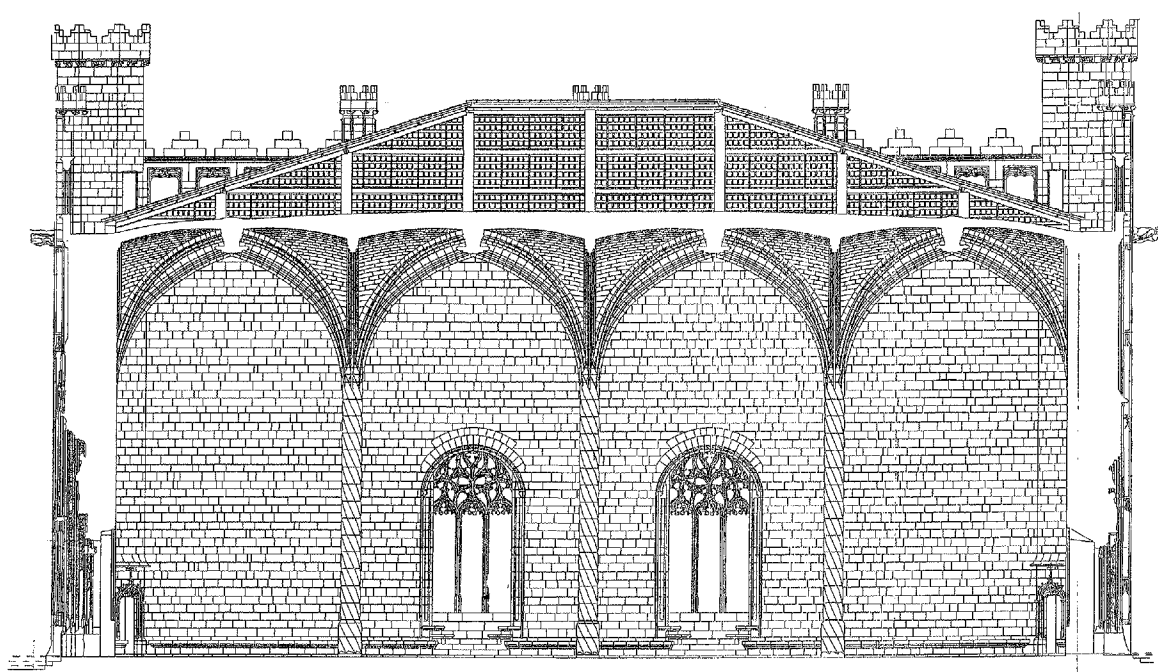
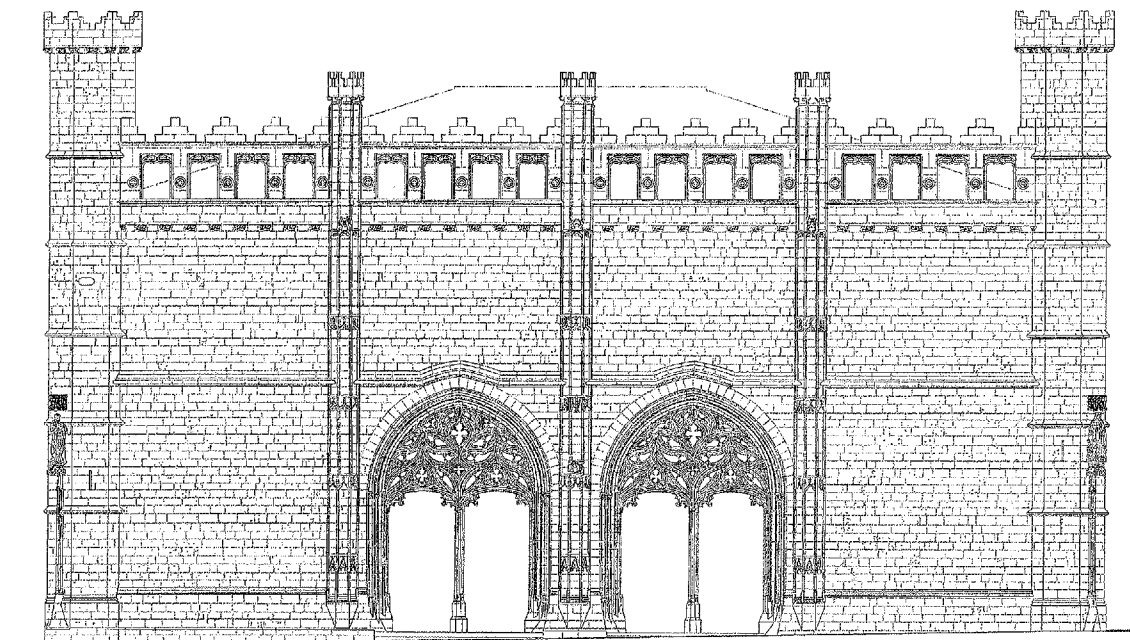


Figura 2

Sección longitudinal y alzado norte (G. Alcázar. Ministerio de Fomento 2000)

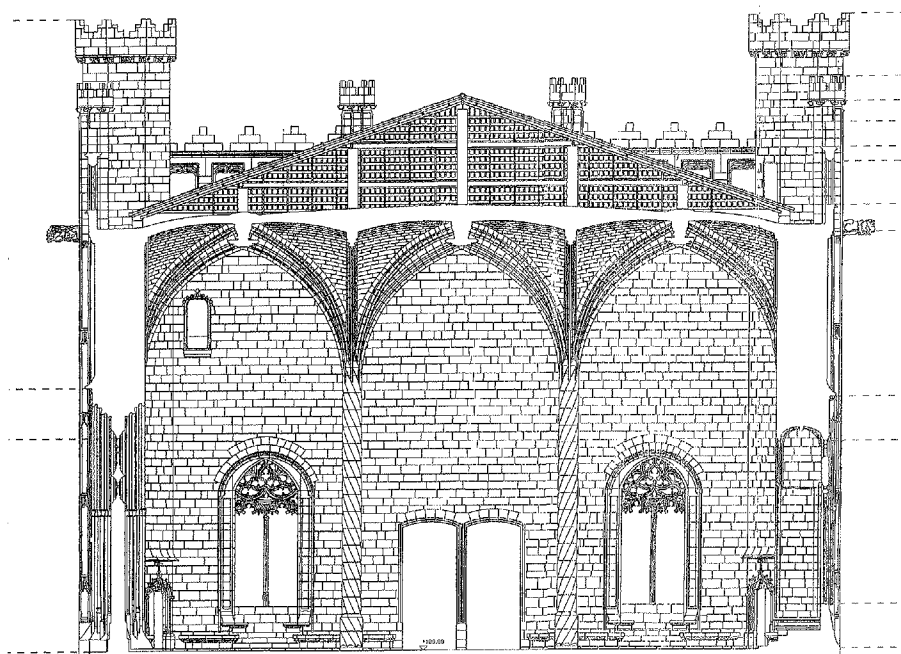
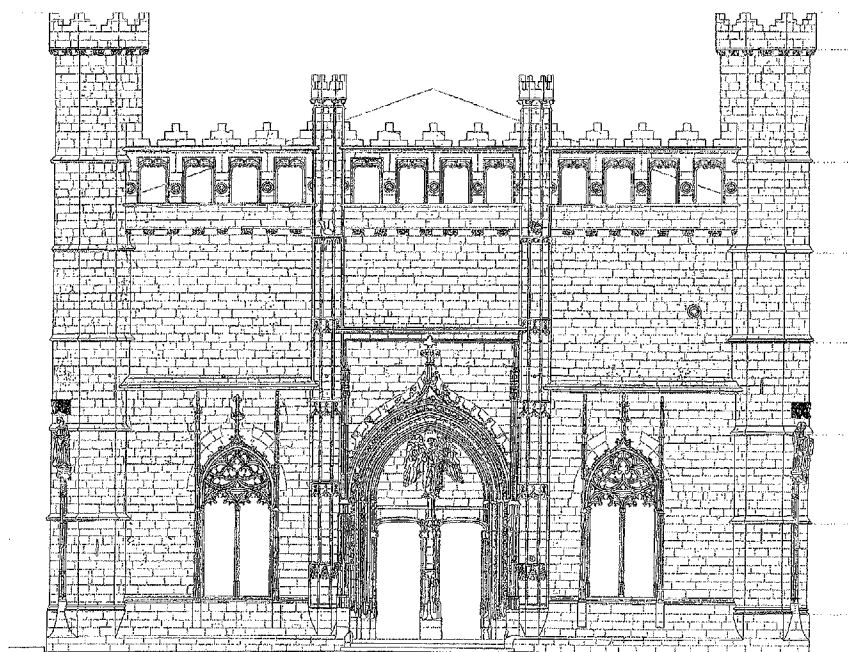


Figura 3
Sección transversal y alzado este (G. Alcázar. Ministerio de Fomento 2000)

1. Marco teórico

Al realizar los estudios se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años —véase Heyman (1995a y 1995b). En este apartado se resumirán los principios e ideas fundamentales.

1.1 El material: hipótesis del análisis límite

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas:

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, pero los casos de deslizamiento entre piedras son extremadamente raros (suelen estar asociados a movimientos sísmicos).

1.2 Condición de estabilidad; seguridad

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas, la «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior.

La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad dependen del tipo y uso de la estructura, y tienen un carácter empírico. En particular, para el caso de edificios, son distintos para arcos y bóvedas y para estribos; el coeficiente de éstos últimos es mucho más restrictivo, por los motivos que se discutirán en el apartado dedicado a la seguridad del sistema de contrarresto.

1.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad

Si la estructura es hiperestática, como es habitual, será posible encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica, que corresponden a las infinitas situaciones de equilibrio posibles (la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio).

Si se cumplen los principios del análisis límite enunciados antes se puede demostrar —véase Kooharian (1953); Heyman (1995, 1999)— el siguiente Teorema Fundamental del Análisis Límite (Teorema de la Seguridad o del Límite Inferior): *Dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material (esto es, que no aparezcan tracciones) la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura la estructura no se hundirá.*

La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Elegida una línea, podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico: sabemos que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad (en general, sería posible encontrar una línea de empujes que diera una situación más favorable).

El problema de la seguridad de las fábricas es, pues, un problema de estabilidad. De los tres criterios fundamentales que debe cumplir una estructura (resistencia, rigidez y estabilidad), es éste último el que gobierna el proyecto de las fábricas: las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas. El criterio de estabilidad conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría: es la forma la que posibilita que las trayectorias de esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica (para una exposición clara y muy detallada de este enfoque, véase Heyman, 1999).

1.4 Movimientos y grietas

Las grietas son algo natural en un material que no resiste tracciones. De hecho, los agrietamientos son la única forma de adaptarse a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno (por ejemplo, a un pequeño desplazamiento de los estribos, etc.). Las grietas dividen la estructura en un conjunto «articulado» de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones de contorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes (distintas soluciones de las ecuaciones de equilibrio). Sin embargo, el Teorema Fundamental nos asegura que, si encontramos «un sistema de líneas de empujes» (esto es una cierta situación de equilibrio) dentro de la fábrica,

aunque pueden moverse bruscamente, éstas nunca se saldrán de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad está asegurada.

1.5 Verificación de la resistencia

Se ha dicho que la resistencia no es el criterio que rige el proyecto de las fábricas. Esta afirmación se puede comprobar calculando las tensiones de trabajo en algunas de las construcciones más grandes. Por ejemplo, la tensión media en la base de los pilares de la catedral de Beauvais que tiene las bóvedas más altas del gótico es de sólo $1,3 \text{ N/mm}^2$.

No obstante, en el caso de que la piedra sea excepcionalmente blanda o que el elemento de estudio soporte cargas concentradas muy grandes, se puede realizar una comprobación de resistencia, tras haber encontrado una situación suficientemente estable. No hay que olvidar que las bajas tensiones no garantizan, en absoluto, una estabilidad segura.

2. Breve descripción constructiva

La Lonja de los mercaderes de Palma fue proyectada y construida por el arquitecto Guillermo Sagrera (1380?–1456). Se empezó a construir en 1421 y el edificio estaba prácticamente terminado cuando Sagrera abandona la obra en 1446. Se conserva el contrato de ejecución de la obra (en la que Sagrera actuó, además de como arquitecto, como contratista) fechado en 1426 (Alomar 1970). En él se alude a unas trazas (que se han perdido) y, principalmente, a los plazos y condiciones económicas, y al programa escultórico. Desde el punto de vista constructivo sólo se indica la altura total de la obra (ocho canas de Montpellier desde el pavimento hasta la clave mayor) y los materiales a emplear en algunos elementos principales: piedra de Santanyi en los pilares, claves y nervios, y piedra de Solleric en los *pendents* (la plementería de las bóvedas); la cubierta será de *trespol*, una suerte de argamasa impermeable empleada en los terrados mallorquines. A finales del siglo XVII se añadió el tejado superior de teja vana sobre viguería de madera apoyando en machones de marés (Jiménez Vidal 1968). La estructura de madera fue sustituida por una de vigas y viguetas de acero en los años 1970, manteniendo la cubierta de teja vana.

2.1 Bóvedas

Las bóvedas son de crucería y cuatrimpartitas. Las dimensiones a ejes vienen especificadas en los planos del informe del Ministerio de Fomento (2000). Por comodidad en las referencias ulteriores, se han nombrado por letras en el siguiente esquema, Figura 4, donde se dan las luces a ejes redondeadas a múltiplos de 5 cm.

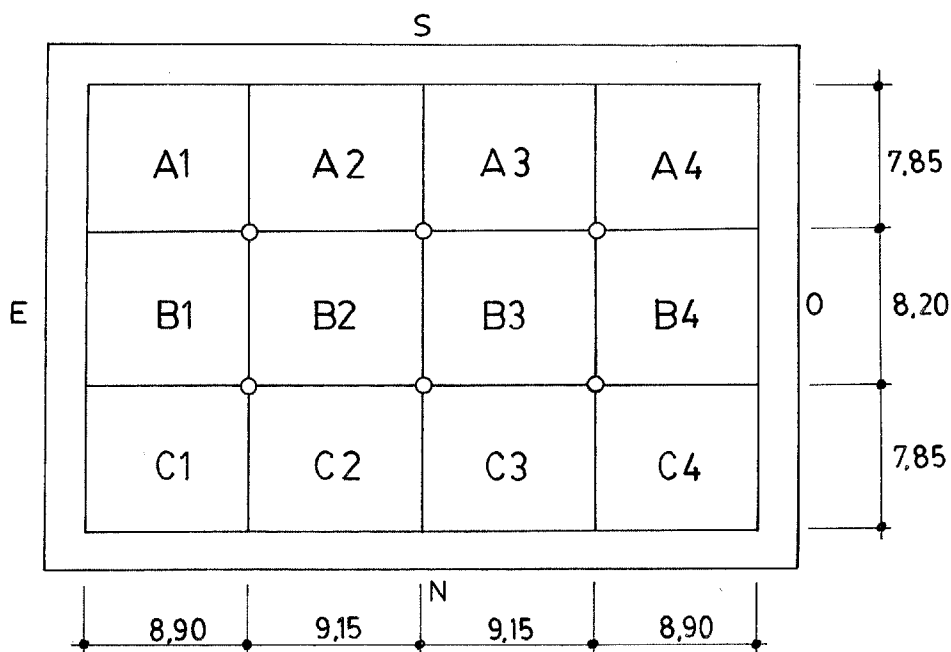


Figura 4

Bóvedas de la Lonja

Arcos cruceros

Los arcos cruceros son, según el levantamiento del Ministerio de Fomento de medio punto, como es frecuente en la arquitectura gótica. Vellés (2003), en su estudio sobre la geometría de las bóvedas de la Lonja, los considera también de medio punto. Su radio es de unos 12 m. Presentan un descuelgue o espesor de unos 45 cm (1 1/2 pie) y un ancho de cerca de 30 cm (1 pie). Si se divide este espesor por la luz media de los tramos centrales $(9,15 + 8,2)/2 = 8,67$ se obtiene una proporción de aproximadamente 1/22, algo más que el 1/24 recomendado por Rodrigo Gil de Hontañón (Huerta 2004). El perfil está moldurado y se presenta en la Figura 5. (Para obtener el perfil se ha utilizado un hilo de estaño de 2mm de diámetro. Se conforma el hilo al perfil y, conocidas las dimensiones generales, se ajusta a una cuadrícula de 4 pulgadas. Este sencillo método se debe a la arquitecta Rosana Guerra y resulta útil para obtener de forma aproximada secciones complejas).

Arcos perimetrales

Los arcos perimetrales de cada tramo de bóveda son apuntados. Parecen tener el mismo radio de curvatura que los cruceros (Vellés 2003). Esta disposición es también frecuente en el gótico (en particular, en las bóvedas del gótico tardío alemán). En esta hipótesis, las claves quedan un poco por debajo de la clave central y así aparecen también en el levantamiento del Ministerio de Fomento (Figs. 2 y 3). El nervio presenta un espesor de unos 60 cm (2 pies) y un ancho de 45 cm (1 1/2 pies). Si se divide el espesor por la luz media del tramos centrales se llega a una proporción de aproximadamente 1/15. Esta proporción es inusualmente grande en el gótico tardío (Rodrigo Gil de Hontañón da, por ejemplo, a los perpiaños 1/20 de la luz media). Este gran espesor sugiere la existencia de un muro superior, oculto por la cubierta plana original. Esta disposición de muros en retícula sobre los arcos perimetrales aparece en la Lonja de Valencia.

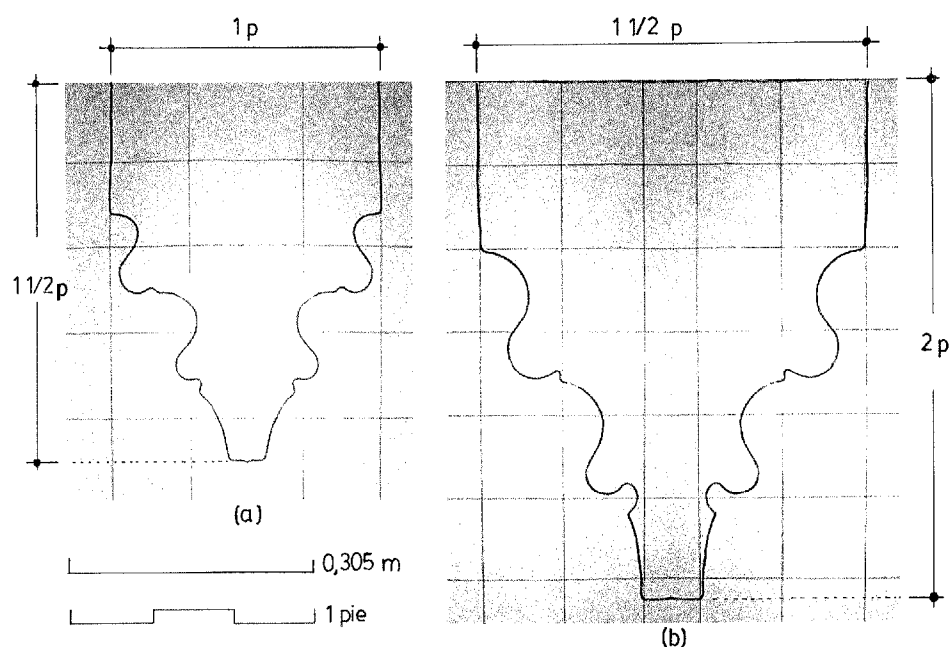


Figura 5

Perfil de los nervios:

(a) Cruceros.

(b) Perimetrales

Plementería

La plementería es de piedra ligera de Solleric: un marés ligero de color casi blanco. En el informe del Ministerio de Fomento se indica un espesor de 15 cm o medio pie, que es una dimensión usual en las bóvedas del gótico tardío en España. En el caso del marés se encuentran en ocasiones espesores de menos de 10 cm.

Rellenos

Las bóvedas están trasdosadas por un relleno que produce una superficie sensiblemente horizontal sobre el que apoya la primitiva cubierta. Ésta está compuesta por tabiquillos y losas de marés, de un espesor de unos 6-8 cm. Sobre las losas se dispuso el *trespól*.

Se desconoce la naturaleza del relleno, pues no hay indicación en los documentos ni hay noticia de catas. No obstante, se tratará con certeza de un relleno ligero del mismo tipo de los empleados en la catedral de Barcelona o en Santa María del Mar. El primer tercio o la mitad de la altura serán de buena mampostería. El resto hasta el trasdós se aligera, posiblemente, incorporando vasijas cerámicas vacías (Bassegoda 1977; véase figura 6) o quizá construyendo contrabóvedas sobre el espacio vacío de los senos (figura 7). Un último procedimiento puede ser el empleo combinado de tabiquillos y contrabóvedas. Con cualquiera de estos métodos se puede reducir el peso específico a más de la mitad, con la consiguiente reducción de carga y del empuje de la bóveda.

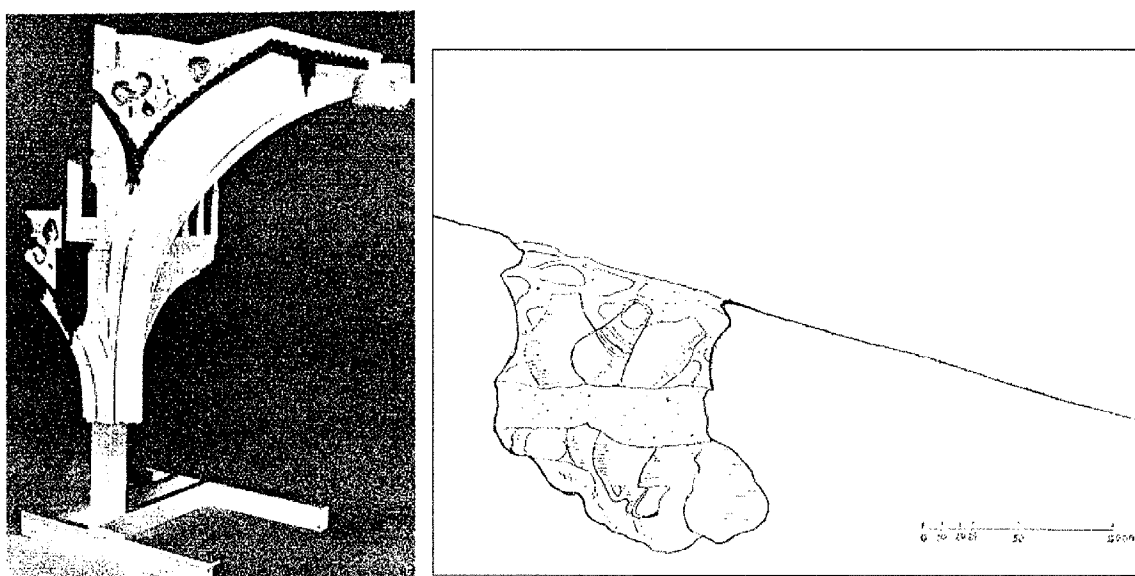


Figura 6

Empleo de vasijas cerámicas para aligera el relleno del trasdós de las bóvedas de la catedral de Barcelona (Bassegoda 1977)

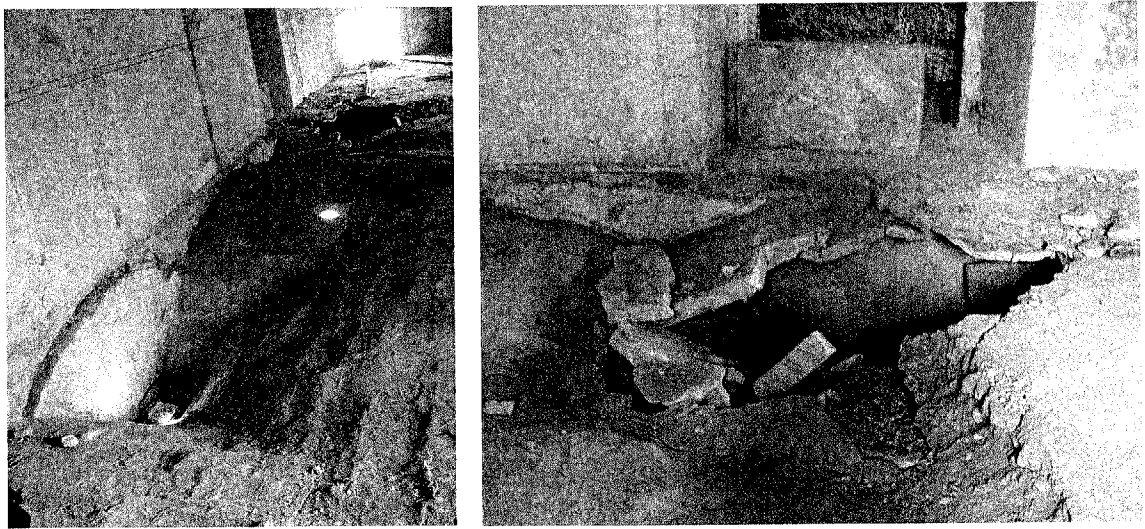


Figura 7

Empleo de contrabóvedas para reducir el relleno. Convento de San Bonaventura en Lluçmajor (Huerta y Rabasa 2006)

Pilares

Los pilares son esbeltas columnas entorchadas, esto es, acanaladas en espiral. Vellés (2003) las ha medido con detalle y lo que sigue está basado en sus observaciones. Están formadas por tambores de piedra de Santanyi, todos ellos de la misma altura: 635 mm ó 25 pulgadas. El diámetro aparente es unas 30 pulgadas y su altura hasta el arranque de los nervios de unos 10 m. La esbeltez es, pues, de 1 á 13. Son pilares esbeltos y esta esbeltez se ve acentuada por el arranque de los nervios del mismo radio en forma de palmera. No obstante, hay ejemplos góticos de pilares mucho más esbeltos. La sección útil del fuste, más delgado que la basa de arranque, puede estimarse en unos 2700 cm².

Muros

La Lonja presenta un grueso muro perimetral, rematado por torreones en las esquinas. El muro tiene un grosor de 2,30 en el arranque, disminuyendo un poco más arriba á 2 m y, finalmente, hasta 1,90 m en su parte superior. Coincidiendo con los enjarjes de las bóvedas, presenta unos someros contrafuertes que sobresalen unos 40 cm.

Para este grosor, el muro consta de dos hojas de sillería y un relleno de mampostería, siguiendo la disposición típica de los muros medievales (figura 8). Las hojas o paramentos son

de sillería de piedra de Santanyi. La labra del exterior y los lechos es muy cuidada, pero la cara que da al relleno se dejaría simplemente desbastada por dos razones: para ahorrar el trabajo de labra y para facilitar el enjarje con el relleno. Muy posiblemente a intervalos se dispondrían tizones (T en la figura 8).

El relleno, según una cata realizada en unos de los torreones, es una mampostería de cascote y piedras (restos de labra etc.) de pequeño tamaño; las piedras tienen una dimensión máxima de unos 10-15 cm. El resultado es una suerte de hormigón donde las piedras se traban unas a otras mediante un mortero que parece una mezcla de cal, tierra y yeso. El resultado es un relleno de excelente calidad que hace cuerpo con los paramentos. La forma de las fisuras que aparecen en el muro confirma esta hipótesis. Cuando el relleno es débil, las grietas siguen la forma del aparejo de la sillería, que rige su formación. Cuando el relleno es fuerte y está bien trabado con los paramentos, es el relleno el que rige la dirección de las grietas, que rompen los sillares, como sucede en la Lonja.

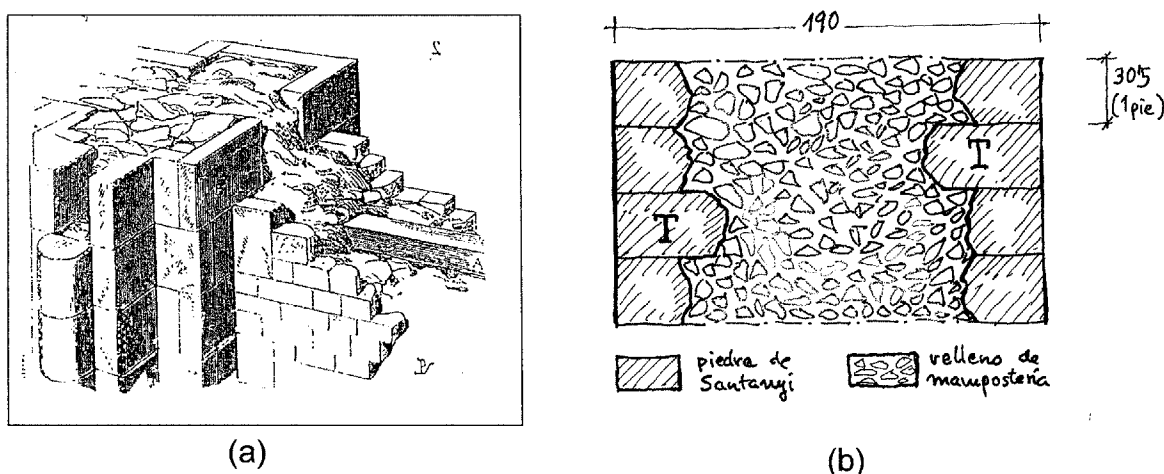


Figura 8

(a) Muro medieval (Viollet-le-Duc 1858); (b) Muro de la Lonja de Mallorca

Torres

Las torres las esquinas de la Lonja tienen varias funciones. Sirven de remate y dan fuerza visual al edificio; contienen, además, las dos escaleras de acceso a la cubierta. Por otra parte, también tienen una función mecánica. El contrarresto de la Lonja está formado por los cuatro muros perimetrales que forman una caja cerrada. En todo este tipo de estructuras, el peligro reside en la formación de grietas en las esquinas que independicen los muros. Las torres, aunque huecas, refuerzan la esquina pues forman un estribo que impide el desplome de los muros hacia fuera en estos puntos críticos.

3. Estado actual: agrietamientos y desplomes

La Lonja, como cualquier edificio de fábrica, presenta agrietamientos visibles en muros y bóvedas. Estos agrietamientos sólo indican que el edificio ha sufrido una adaptación a pequeñas variaciones de las condiciones de contorno y, en sí mismos, sólo son indicio de la naturaleza unilateral (resiste compresiones y no tracciones) del material.

3.1 Muros

En los edificios abovedados de fábrica, en general, los agrietamientos se deben a ligeros desplomes del sistema de contrarresto debidos a pequeños asentos de la cimentación. Una buena manera de visualizar los movimientos para luego interpretar los agrietamientos es realizar un levantamiento de los desplomes a una cierta altura.

En este caso se han medido los desplomes de los muros a la altura de los arranques de las bóvedas, a 10 m del nivel del suelo. La medición la ha realizado la arquitecta Ana López Mozo, profesora de la ETSAM. Ha empleado una estación total de láser, con una precisión de ± 5 mm. Los desplomes se han representado en la figura 9.

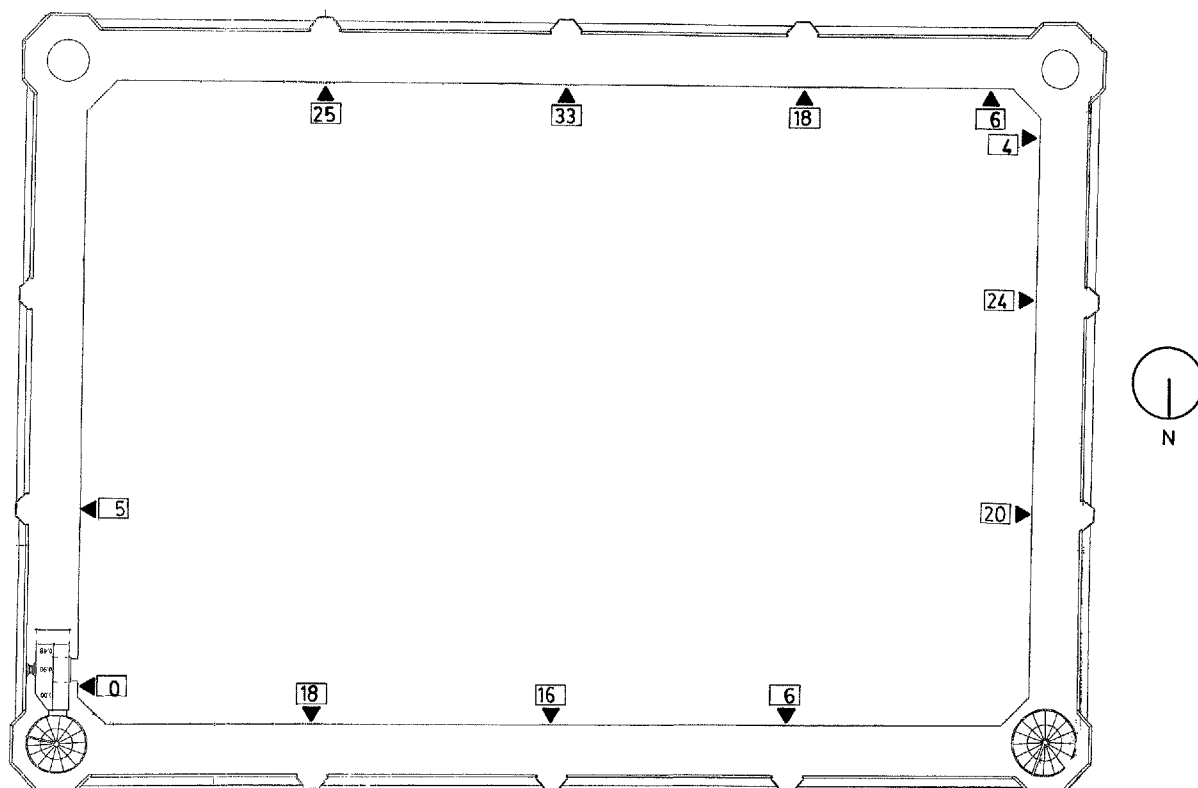


Figura 9

Desplomes de los muros (mm) medidos a la altura de los arranques de las bóvedas (10 m del suelo). Las flechas indican la dirección del desplome

Puede verse que los desplomes están comprendidos entre 4 y 33 mm. Para una altura de 10 m esto significa entre 1/2500 y 1/300 de la altura (parecida proporción se encuentra en relación con la luz de los tramos adyacentes, de unos 8 m.), con ángulos de inclinación entre 0,02° y 0,2°. Se trata a todas luces de valores insignificantes, que ni siquiera se pueden dibujar en la figura 9 pues son del orden del espesor de las líneas del dibujo. Esto es, a efectos del análisis estructural, es como si la estructura no se hubiera deformado. Valores 5 veces mayores son frecuentes en construcciones de fábrica y tampoco son infrecuentes valores 10 o más veces superiores. (En estos casos, es preciso trabajar con la geometría deformada; véase Huerta y López 1997).

Por supuesto, estos pequeños desplomes (acompañados quizá de pequeños asientos) dan lugar a agrietamientos visibles en los muros: las grietas se dibujan con claridad en algunos lugares sobre la sillería regular de piedra de Santanyi, partiendo los sillares que encuentran a su paso. Algunas grietas fueron tapadas y, tanto en el exterior como en el interior, un ojo experto puede encontrarlas sin dificultad. Pero estas grietas, hay que insistir de nuevo, no suponen ningún peligro ni indican ninguna deficiencia de estabilidad.

Por otra parte, las grietas no “cortan” el muro de manera que queda dividido en dos partes que pueden moverse con independencia. El pequeño grosor de las grietas de la Lonja, con un máximo de unos 2 cm y en general de de menos de 1 cm, hace que se mantenga la conexión y una cierta resistencia a cortante en la propia grieta (la mampostería irregular forma una especie de dientes que impiden el movimiento transversal a ambos extremos de la grieta. Esto puede verificarse con facilidad sin más que observar que el plano del muro no presenta saltos aunque esté cruzado por una grieta.

Finalmente, hay que señalar que los testigos colocados en el año 2000 en algunas grietas están intactos tras ocho años. (En ocasiones, los movimientos tienen carácter estacional, las grietas se abren y cierran dependiendo de variaciones en el terreno, etc., y, aunque, los testigos se partan los movimientos no implican riesgo alguno.)

3.2 Bóvedas

El movimiento de los muros ha producido grietas en los nervios y en las bóvedas. Son más visibles en la esquina SE, pero el examen de las bóvedas deja ver otras grietas que fueron tapadas en alguno de los sucesivos trabajos de reparación que han tenido las bóvedas.

Como en los muros, las grietas lo que hacen es “dividir” la bóveda en una serie de partes que se articulan para permitir el movimiento. De nuevo no suponen ningún peligro sino que manifiestan la extrema “plasticidad” de la fábrica para adaptarse a cualesquiera pequeños movimientos sin disminución alguna de la seguridad (Heyman 1995).

En la figura 10 se muestran los agrietamientos típicos de una bóveda de crucería y el

mecanismo que los produce. En el dibujo, el movimiento es simétrico de apertura. Otros movimientos asimétricos (o compuestos: apertura más asiento diferencial) pueden dar lugar a agrietamientos más complejos y difíciles de interpretar, pero igualmente inocuos. Sólo grietas activas que produzcan grandes deformaciones deben causar cierta preocupación y pueden requerir un estudio detallado. No es el caso en la Lonja de Palma.

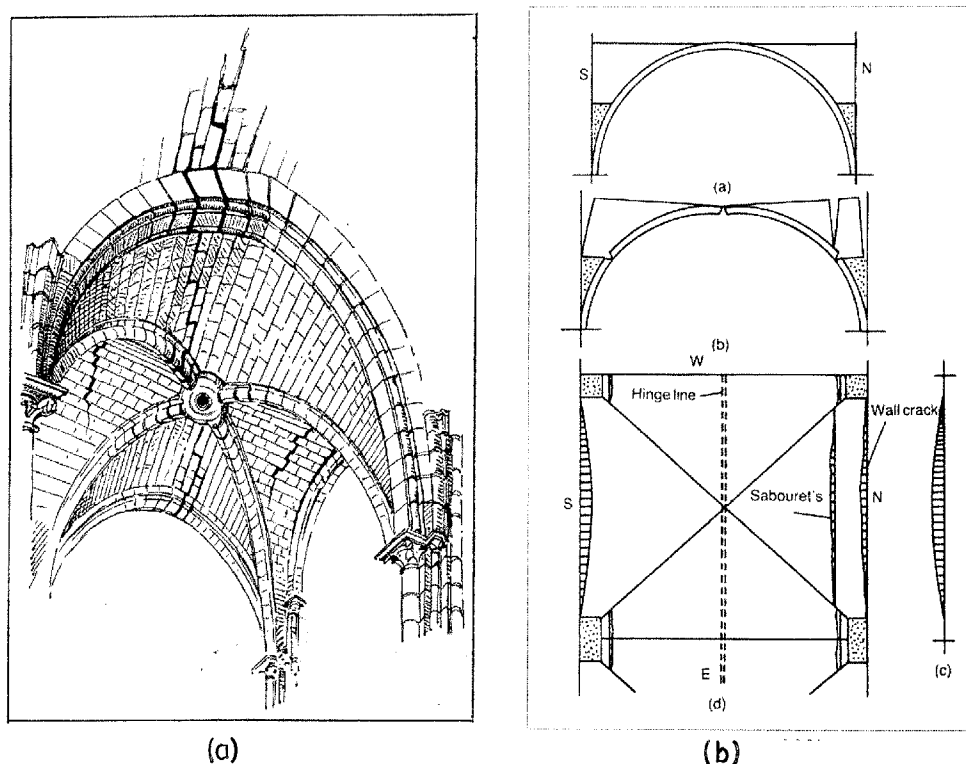


Figura 10

Agrietamientos típicos en una bóveda de crucería. (a) Descripción de las grietas (Abraham 1934); (b) Explicación del movimiento (Heyman 1983)

4. Análisis de estabilidad

La pequeña magnitud de los desplomes son ya un indicativo cierto de una estabilidad suficiente, sobre todo cuando el edificio tiene más de cinco siglos de antigüedad y ha estado sometido ha cambios en su uso y en su entorno. No obstante, para despejar cualquier tipo de duda, se realizará un análisis de estabilidad.

La estructura de la Lonja es simple: las bóvedas de crucería del borde del salón empujan contra el muro perimetral que hace de contrarresto. Este muro presenta algunos ventanales pero estos representan un volumen muy pequeño del total y apenas aligeran el muro.

4.1 Las reglas estructurales del gótico

Una primera verificación consiste en obtener la relación estribo/luz y compararla con las reglas de proporción empleadas por los maestros góticos. Estas reglas son esencialmente correctas (Heyman 1999, Huerta 2004) y, en cualquier caso, conviene no olvidar que fueron estas consideraciones de tipo geométrico las que guiaron el proyecto.

Una regla gótica de gran difusión daba al estribo $1/4$ de la luz, para un estribo adosado a un muro que, en general, presentaba un gran ventanal. En este caso, la relación entre el espesor del muro en el arranque (1,9 m) y la luz vale:

- en sentido longitudinal: $1,9/7,3 = 1/3,9$
- en sentido transversal: $1,9/8,3 = 1/4,3$

En ambos casos muy cerca de la regla gótica.

Otra conocida regla gótica se basa en una construcción geométrica (figura 11): se divide el intradós del arco perpiño en tres partes (puntos F) y se traza una recta que une el arranque con uno de los puntos (AF) llevando la misma distancia (AE) en prolongación. La vertical que pasa por el punto E da el estribo. De nuevo la regla da una dimensión muy parecida, aunque menor, al contrarresto de la Lonja.

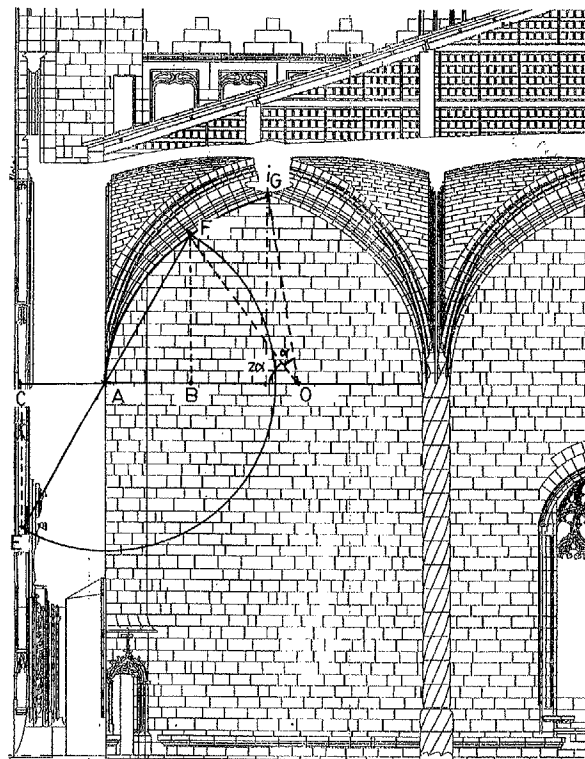


Figura 11

Aplicación de una regla geométrica gótica al contrarresto longitudinal de la Lonja

Si bien en las dos comprobaciones anteriores el muro es un poco más delgado que el estribo hay que tener en cuenta que el contrarresto de la Lonja es un muro continuo, con mucho mayor peso que un estribo gótico convencional, y, por tanto, el espesor podría reducirse considerablemente. Así, pues, el proyecto de Sagrera incorpora una considerable seguridad a las proporciones góticas, como no podría ser de otra manera, dada la importancia del edificio y la responsabilidad completa asumida en el contrato “leonino” firmado con los mercaderes de Palma (Cantarellas Camps 2003).

En cualquier caso, conviene no olvidar que las reglas de proporción eran sólo un registro empírico de proporciones estables. Se aplicaban dentro de un marco de conocimiento muy amplio, el de la “ciencia medieval de las estructuras”, y, sólo podían ser aplicadas y verdaderamente entendidas por los maestros. Hoy día, dan una referencia sobre las proporciones generales del edificio; pero no somos maestros góticos e ignoramos la mayor parte de su ciencia (Huerta 2006) y sólo deben ser empleadas como referencia.

4.2 Forma general de las bóvedas

Una bóveda de crucería puede imaginarse idealmente como la intersección de dos cañones cilíndricos apuntados. En realidad, la bóveda de crucería queda definida por la forma de los nervios. En primer lugar se decide la intersección, estos es, los arcos cruceros, que en este caso son de medio punto. Después, se decide la de los arcos perimetrales (perpiaños y formeros). La plementería es una delgada cáscara que cubre el espacio entre nervios y que, usualmente, presenta doble curvatura.

En el caso de la Lonja, como se ha dicho, todos los nervios parecen tener una curvatura similar a la de los nervios cruceros. Como consecuencia de ello, las claves de los arcos perimetrales están ligeramente más bajas que la clave mayor. La ventaja de emplear el mismo radio de curvatura es evidente: las plantillas son las mismas y los mismos camones se pueden emplear para las distintas cerchas. En la figura 12, se ha dibujado esquemáticamente la geometría de los nervios. (Por supuesto, los nervios no son líneas y las variaciones de espesor y el grosor de los arranques introducen necesariamente pequeñas variaciones con las que el maestro jugaba.)

Las uniones entre la clave mayor y las claves de los arcos perimetrales son líneas ligeramente abombadas hacia arriba. La forma concreta de los plementos es difícil de precisar pero, como se verá, esto no es importante desde el punto de vista de la estabilidad que viene determinada por la forma general de la bóveda, pudiendo suponerse cualquier superficie (quizá reglada) que simplifique los cálculos.

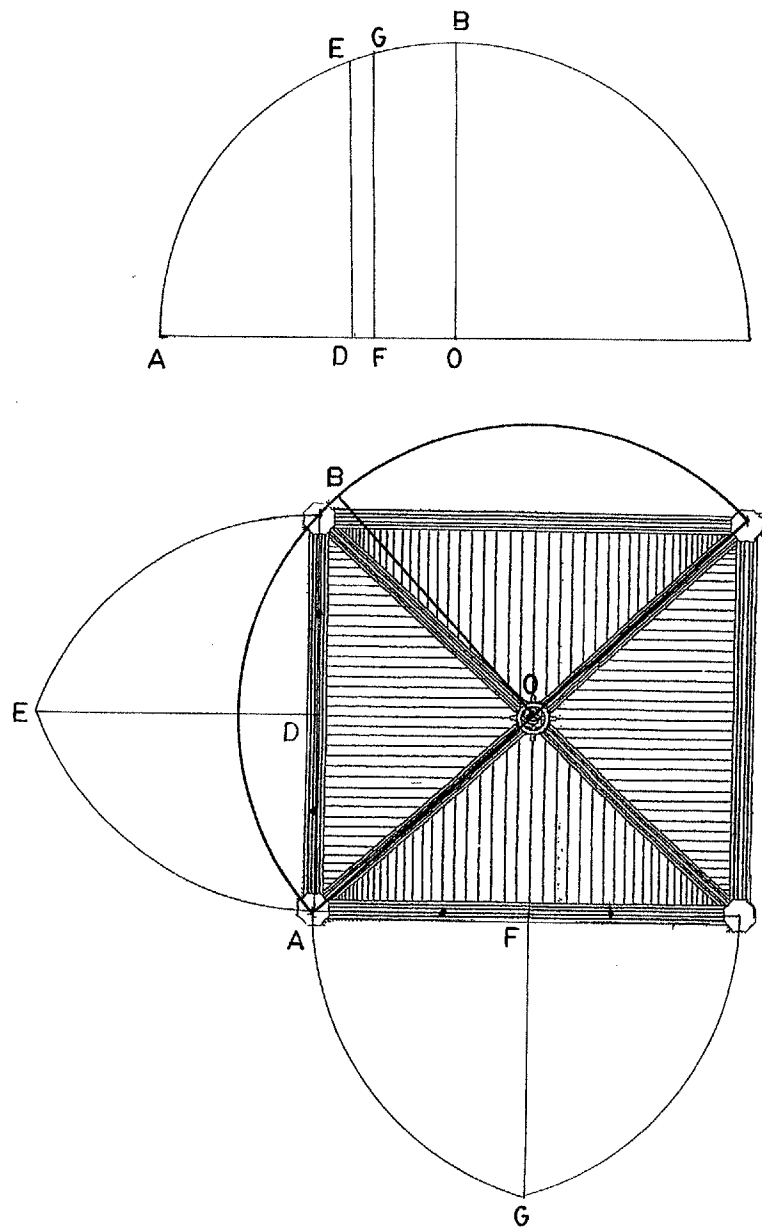


Figura 12

Forma general de las bóvedas de la Lonja: geometría de los nervios

4.3 Sobre el análisis de las bóvedas de crucería

Una bóveda de arista o crucería es una estructura con un alto grado hiperestático que puede resistir sus cargas de infinitas maneras. Gracias al Teorema de la Seguridad del Análisis Límite, el analista puede elegir la situación de equilibrio, siempre que respete la condición de cedencia del material: en este caso, la fábrica debe trabajar a compresión. Así, cual sistema de esfuerzos internos que transmita las cargas dentro de la fábrica es una solución segura.

Resulta útil imaginar los cañones divididos en arcos elementales que, a su vez, apoyan sobre los arcos cruceros (aristas), como se ha dibujado en la figura 13. A la izquierda, aparece el modelo funicular que ayuda a entender la transmisión de las cargas. A la derecha, la división en arcos elementales.

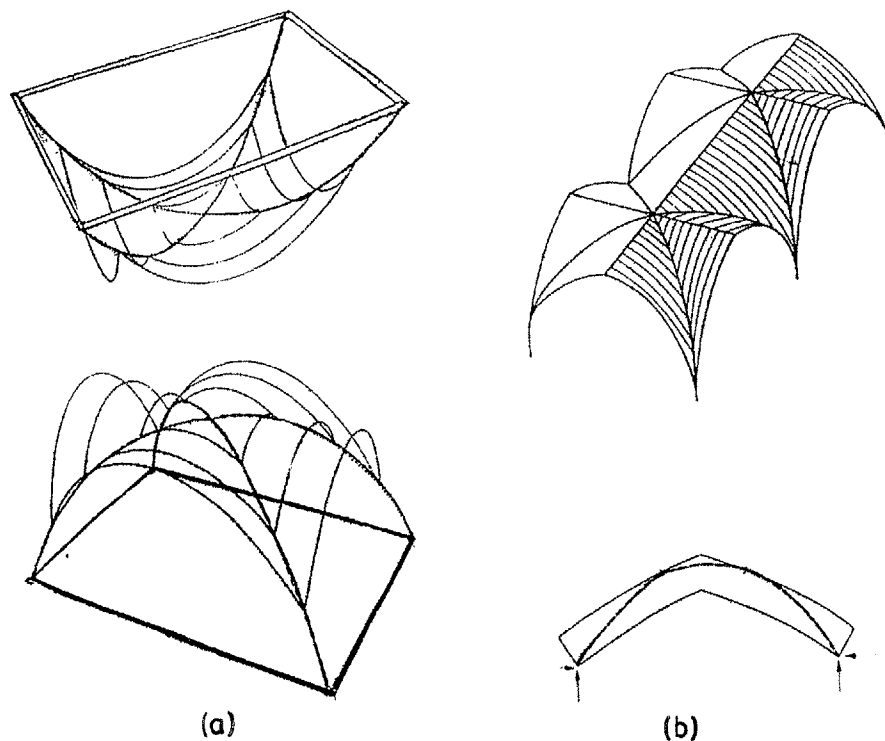


Figura 13

Análisis de una bóveda de arista “cortándola” en arcos elementales: (a) modelo catenarior (Beranek 1988); (b) división en una bóveda real (Heyman 1999).

El modelo de funcionamiento permite un cálculo muy aproximado del empuje de la bóveda pero, sobre todo, hace ver que en las aristas se van a producir concentraciones de tensión. Una de las funciones del nervio crucero gótico es reforzar la sección en la zona en que los esfuerzos se incrementan. Para dimensiones y cargas normales, la bóveda puede construir sus propios nervios en el espesor de su casco.

El cálculo del empuje de la bóveda por el método de los cortes es algo laborioso pero conduce a un valor muy fiable del empuje; este enfoque se seguía usando a mediados del siglo XX (Zorn 1933; Grassnick 1963). No obstante, hay que señalar que la precisión del trabajo, por laborioso que sea, no es superior a la de los datos de que se dispone. Con mucha frecuencia, en el campo de las estructuras históricas se disponen sólo de datos aproximados sobre los espesores de la plementería y la naturaleza interna de los rellenos que son determinantes en el cálculo del empuje. El conocimiento de estos datos supondría realizar un gran número de catas. Esta tarea estaría justificada sólo en los que una situación alarmante obligara a un cálculo muy exacto.

En el caso de la Lonja, como se ha discutido en el apartado 2, sólo se pueden hacer conjeturas razonables, dentro del contexto de la historia de la construcción, sobre la naturaleza de los rellenos, la existencia de muros, etc. En esta situación no está justificado el empleo del método de los cortes.

4.3 Cálculo del empuje de la bóveda

Como alternativa al laborioso método de los cortes, algunos autores de finales del siglo XIX se dieron cuenta de que, realmente, el empuje depende de la forma general de la bóveda y acometieron cálculos rápidos aproximados. En efecto, conocidos la resultante de los pesos y cargas que actúan sobre la bóveda y su línea de acción, para una bóveda simétrica en la que el empuje debe ser horizontal en la línea de clave, sólo queda decidir la inclinación del empuje, que queda determinado por el perfil general de la bóveda.

Esta es la idea que siguió Mohrmann (Ungewitter 1890), que elaboró unas tablas para el cálculo rápido de los empujes, que han sido recogidas por Heyman (1999). La Figura 14 explica con claridad el equilibrio global de la semibóveda.

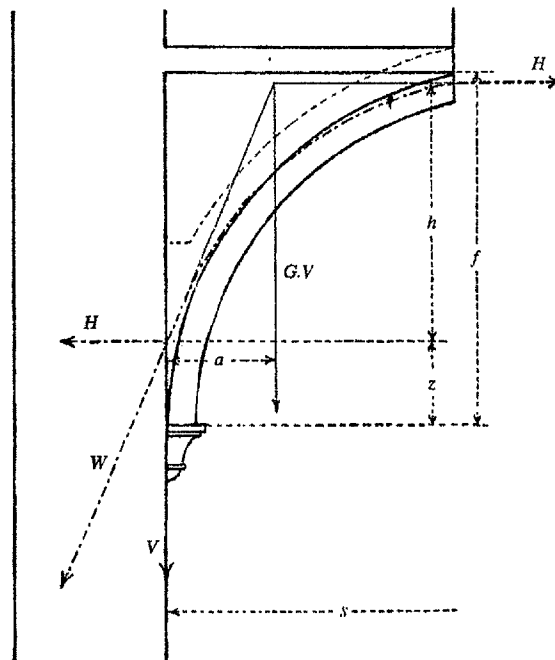


Figura 14.

Equilibrio global de la semibóveda para el cálculo rápido de su empuje, conocida la resultante de todas las cargas y su línea de acción (Ungewitter/Mohrmann 1890)

Las tablas de Mohrmann no recogen el caso de trasdosado horizontal, ni por supuesto la existencia de rellenos aligerados. Así, pues, en lo que sigue se seguirá el mismo enfoque pero calculando los pesos y volúmenes de la semibóveda para las dimensiones de la Lonja.

Cálculo simplificado de volúmenes y pesos de bóvedas trasdosadas horizontalmente

Con el fin de no alargar innecesariamente los cálculos, en este caso se calculará el empuje de una bóveda tipo cuadrada. Luego esta bóveda se “estirará” en uno u otro sentido para tomar las proporciones de los tramos considerados.

Hay varias maneras de considerar la forma de la plementería para unos nervios dados. Los volúmenes y pesos que conducen a un cierto empuje, varían muy poco se considere uno u otro tipo de superficie. Dada la incertidumbre en la naturaleza de los rellenos, no tiene ningún sentido “afinar” eligiendo superficies complejas. Se ha tomado, pues, una superficie generada por una recta que, manteniéndose horizontal apoya en el arco perimetral y el crucero. En la figura 15 se han representado las generatrices para una división del arco perimetral en siete partes. La parte superior no pudo generarse con generatrices horizontales dado que la clave central está más alta. Se ha supuesto, entonces, que la carga es uniforme para ese tramos central (de forma estrellada).

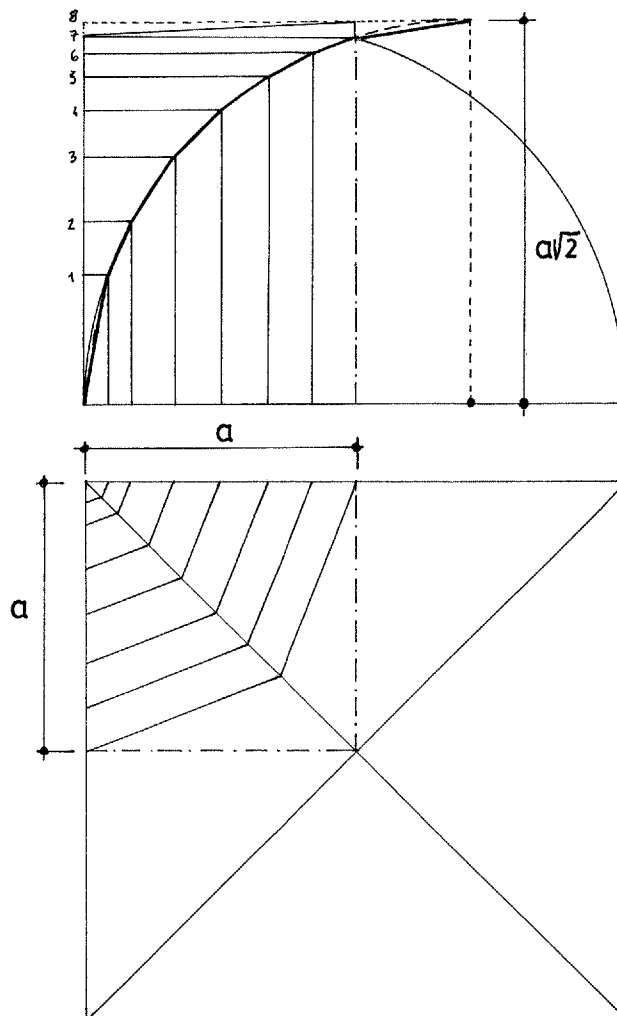


Figura 15

Intradós en forma de superficie reglada de generatrices horizontales que apoyan en crucero y formero

Se han calculado los volúmenes y los centros de gravedad de cada uno de los troncos de pirámide que conforman un cuarto de bóveda de lado a . Los resultados se dan en la siguiente tabla, donde V es el volumen de cada tronco de pirámide y x_g es la distancia horizontal al plano vertical que pasa por el arranque:

	$(V/a^3) \times 1000$	x_g/a
1	0,777	0,028
2	2,246	0,047
3	11,087	0,100
4	20,850	0,150
5	29,372	0,211
6	35,700	0,272
7	38,946	0,323
8	6,259	0,73

Tabla 1

Volúmenes y posiciones del centro de gravedad de la bóveda cuadrada de la figura 15

El volumen total de un cuarto de bóveda trasdosada horizontalmente resulta de sumar la segunda columna y vale $0,14524 \cdot a^3$.

La utilidad de la tabla es que permite hacer diversas hipótesis en cuanto a la naturaleza del relleno para cada una de las divisiones tomadas. Después, es sencillo obtener el peso total de una semibóveda y su centro de gravedad. Finalmente se decidirá el empuje en base a consideraciones globales de equilibrio como en la figura 14.

La expresión general del peso de una semibóveda de forma rectangular será:

$$P_b = \alpha \cdot k \cdot \gamma \cdot 0,29048 \cdot a^3 \quad (1)$$

donde:

a = lado mayor del rectángulo

α = proporción del tramo rectangular respecto al lado mayor

k = constante que depende del peso específico de la fábrica y del grado de aligeramiento

γ = peso específico de la fábrica maciza

Estabilidad del tramo más desfavorable

En el caso de la Lonja de Palma interesa calcular el empuje de las bóvedas que producen la peor situación de estabilidad respecto al sistema de contrarresto. Evidentemente, son las de los tramos centrales y se han marcado en la figura 16. Las proporciones son ligeramente

distintas, pero el área en proyección horizontal es muy similar en ambos casos. Sin embargo, en el tramo marcado como B1-C1 la longitud de muro de contrarresto es menor y se estudiará este caso. Para este caso:

$$a = 8,90$$

$$\alpha = 8 / 8,90 = 0,9$$

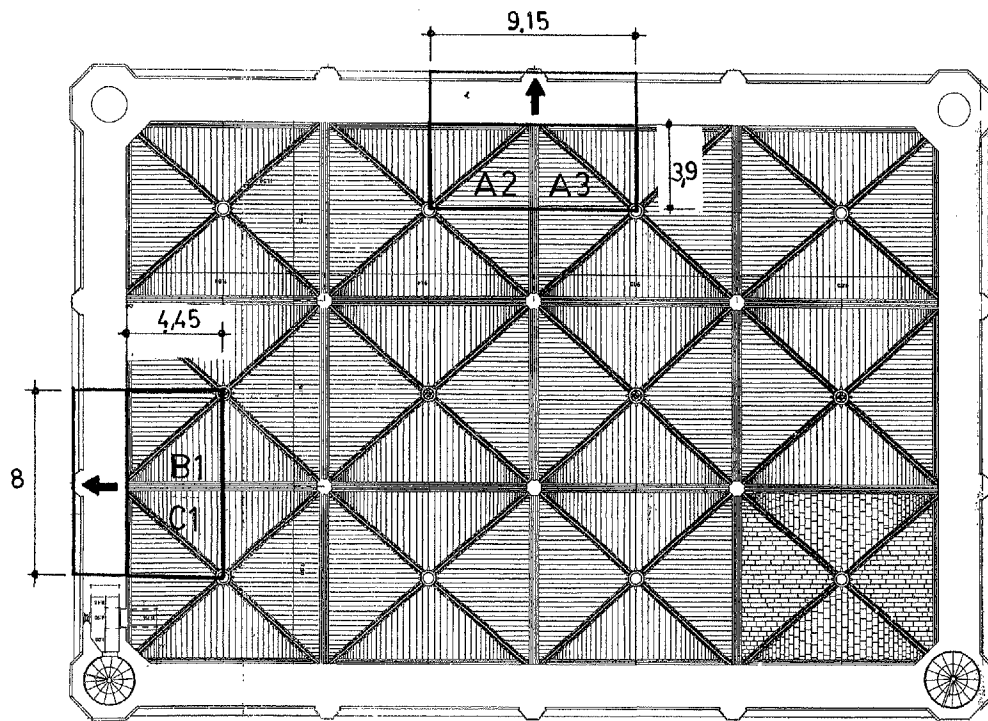


Figura 16

Tramos más desfavorables para la estabilidad del muro

Queda por obtener el coeficiente k y la posición del centro de gravedad. Utilizaremos la tabla 1 con este propósito. Se considerará que las cuatro primeras rebanadas son macizas y tienen un peso específico γ . El resto tienen un peso específico menor β y donde $\beta < 1$. El peso total será entonces proporcional a:

$$(0,777 + 2,246 + 11,087 + 20,85) \gamma + (29,372 + 35,7 + 38,946 + 6,259) \beta \gamma = \\ = \gamma (34,96 + 110,28 \beta)$$

El peso total de un cuarto del tramo cuadrado de lado a será:

$$(a^3 \cdot 10^{-3}) \gamma (34,96 + 110,28 \beta)$$

Por tanto, k en la ecuación (1) más arriba vale:

$$k = 10^{-3} \cdot (34,96 + 110,28 \cdot \beta)$$

La posición del centro de gravedad se obtiene tomando momentos respecto al arranque. El momento de los pesos de las rebanadas será:

$$\begin{aligned} & (0,777 \cdot 0,028 + 2,246 \cdot 0,047 + 11,087 \cdot 0,1 + 20,85 \cdot 0,15) \gamma + \\ & + (29,372 \cdot 0,211 + 35,7 \cdot 0,272 + 38,946 \cdot 0,323 + 6,259 \cdot 0,73) \beta \gamma = \\ & = \gamma (4,363 + 33,056 \cdot \beta) \end{aligned}$$

El momento del peso total:

$$x_g \cdot \gamma (34,96 + 110,28 \beta)$$

De donde:

$$x_g = (4,363 + 33,056 \cdot \beta) / (34,96 + 110,28 \beta)$$

El trabajo de obtener expresiones generales se ve compensado por la facilidad de realizar diversos tanteos.

Consideramos dos casos:

- 1) $\beta = 0,6$ poco aligeramiento
- 2) $\beta = 0,3$ bastante aligeramiento

Para un peso específico $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ (fábrica maciza de piedra de Santanyi), obtenemos los siguientes valores de k , x_g y P_b , para $a = 8,90$, $\alpha = 0,9$

β	k	x_g / a	$P_b \text{ (kN)}$
0,6	0,101	0,24	317
0,3	0,068	0,21	213

Así, pues, en el primer caso suponiendo un relleno poco aligerado de $0,6 \cdot 17 = 10,2 \text{ kN/m}^3$, la semibóveda pesa 317 kN ó 32 toneladas y su centro de gravedad está situado a $0,24 \cdot 8,9 = 2,14 \text{ m}$ del arranque.

En el primer caso suponiendo un relleno bastante aligerado de $0,3 \cdot 17 = 5,1 \text{ kN/m}^3$, la semibóveda pesa 213 kN ó 22 toneladas y su centro de gravedad está situado a $0,21 \cdot 8,9 = 1,87 \text{ m}$ del arranque.

A esto hay que sumar:

- el peso de los nervios cruceros y perpiaños
- el peso de la cubierta de marés con sobrecarga de mantenimiento.

Los arcos perpiaños tienen un área de $(2/3) (0,6 \times 0,45) = 0,18 \text{ m}^2$ y los cruceros de $(2/3) (0,45 \times 0,30) = 0,09 \text{ m}^2$ (se considera que el molde quita $1/3$ al rectángulo capaz). El radio del arco crucero es $(1/2) (8,9^2 + 8,2^2)^{1/2} = 6,05 \text{ m}$. Este es también el radio de curvatura del arco perpiaño. Mediante sencillas consideraciones geométricas se llega a que el volumen de los arcos cruceros que acometen al arranque (dos medios cruceros) es: $1,77 \text{ m}^3$ y el del arco perpiaño de $0,7 \text{ m}^3$. Ambos son de piedra de Santanyi, luego su peso será de

$$(1,77 + 0,7) 17 = 42 \text{ kN}$$

Para la cubierta de losas y tabiquillos se puede tomar un recubrimiento equivalente a 20 cm de marés ó 3 kN/m^2 . Para el área de la semibóveda $(8,2 \times (8,9/2)) \text{ m}^2$ conduce a un peso total de 110 kN .

Así pues es el peso total de la bóveda V valdrá:

$$1) \beta = 0,6: 317 + 42 + 110 = 469 \text{ kN}$$

$$2) \beta = 0,3: 213 + 42 + 110 = 365 \text{ kN}$$

La adición de estos pesos desplazaría ligeramente el centro de gravedad de la bóveda hacia la derecha. En la figura 17 se representan los parámetros geométricos fundamentales:

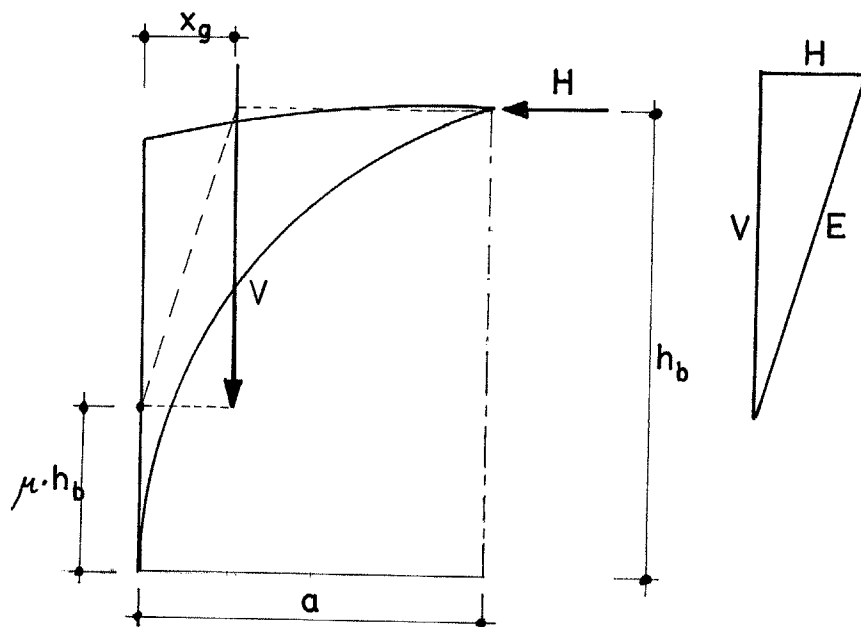


Figura 17

Parámetros geométricos fundamentales del equilibrio de la semibóveda

Para manejar adecuadamente las ecuaciones es preciso realizar todavía algunas simplificaciones. Por ejemplo, el valor de x_g se puede considerar fijo e igual a $a/4$. El coeficiente μ define el valor y la altura de actuación del empuje. Un valor de $\mu = 0,25$ conduciría a una relación V/H de aproximadamente 4. (Comparando con los valores de las tablas de Mohrmann/

Ungewitter (Heyman 1999) se encuentran valores parecidos para la misma relación flecha/luz). Así, pues, para los dos casos de aligeramiento se tomarán los valores indicados.

4.4 Estabilidad del sistema de contrarresto

Conocidos el valor y la posición del empuje de la semibóveda, la tarea de evaluar el sistema de contrarresto es relativamente sencilla. Se supondrá que todo el muro del mismo ancho que el tramo considerado (8 m) actúa de contrarresto. Esta hipótesis puede hacerse dado el grosor y la buena fábrica del muro. Se supondrá que el peso específico del muro es el mismo que el de la piedra de Santanyi (17 kN/m^3). Es cierto que el relleno presentará un porcentaje de mortero, pero en la cata realizada en la torre se pudo apreciar la existencia de guijos de pedernal y otras piedras pesadas inútiles para la labra.

El efecto del tejado de teja también se considerará. Como puede verse en las secciones las vigas apoyan sobre machones situados alternativamente sobre las claves y los pilares. así, en nuestro caso habrá una carga total P_c que actuará sobre las calves de cruceros y del perpiaño. Es indiferente como se reparta, dado que su posición respecto al muro está fijada. Para hallar su valor basta multiplicar la mitad del peso del tejado situado sobre la clave (la otra mitad se va directamente al muro). Una estimación generosa puede ser $1,5 \text{ kN/m}^2$, en los que se considera incluido el peso del pequeño machón de marés. Entonces,

$$P_c = (1/2) (8 \times 4,45) 1,5 = 26,7 \text{ kN}$$

Imaginamos que la transmisión de la carga se produce según la línea de puntos de la figura 18, de manera que el empuje horizontal es $H_c = 36 \text{ kN}$, aproximadamente.

Queda por calcular el peso del estribo. En la base tiene un espesor de 2 m (ignorando el pequeño plinto de arranque) y hacia la mitad de la altura se reduce a 1,9 m. Hay un contrafuerte que despreciaremos para mayor facilidad en el cálculo. El peso del estribo valdrá entonces

$$P_e = (0,8) \times [(8 \times 8 \times 2) + (8 \times 8 \times 1,9)] \times 17 = 3395 \text{ kN}$$

el factor 0,8 tiene en cuenta la reducción de peso por los huecos.

El resto de los parámetros geométricos de la figura son:

$$h = 11,5 \text{ m}$$

$$h_c = 13,2 \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ m}$$

x = distancia a la que actúa la resultante en la base

Las fuerzas son:

peso y empuje del tejado: $P_c = 26,7 \text{ kN}$; $H_c = 26,7 \text{ kN}$

peso y empuje de la bóveda: V : 1) $V = 469 \text{ kN}$ 2) $V = 365 \text{ kN}$. H : 1) y 2) $H = V/4$

peso del estribo: $P_e = 3395 \text{ kN}$

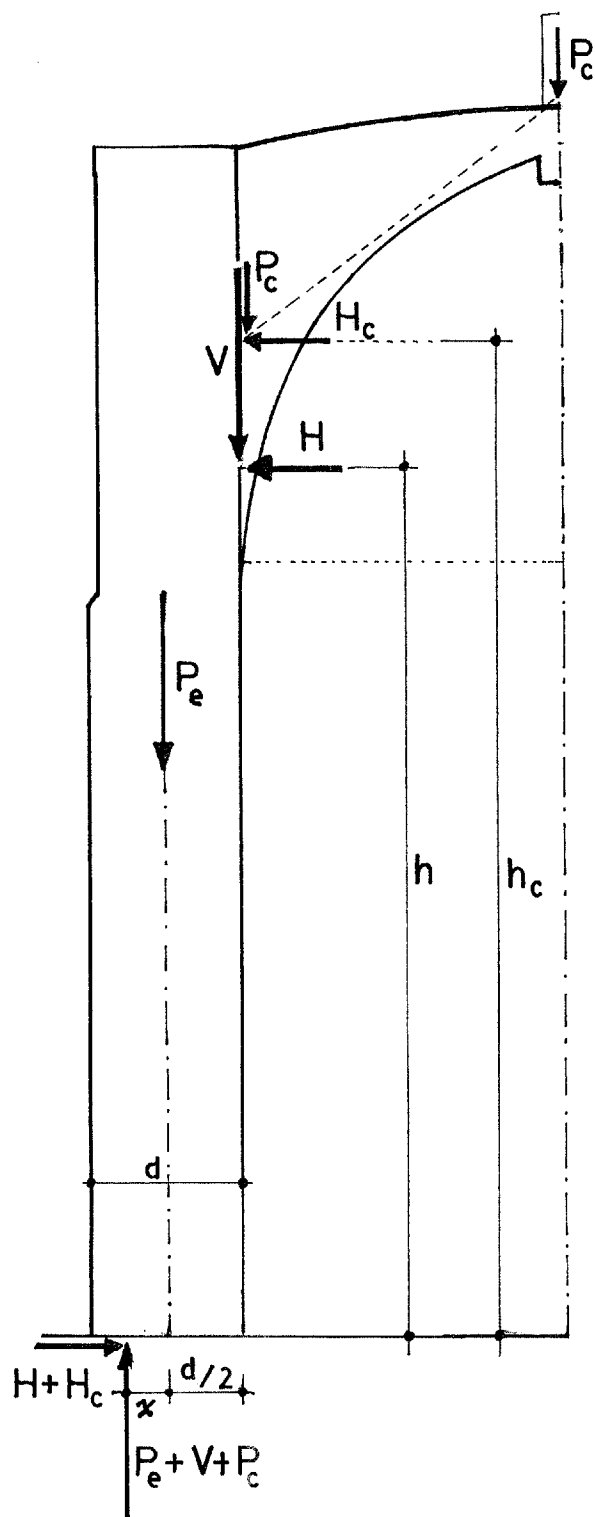


Figura 18

Estabilidad del sistema de contrarresto de la Lonja de Palma

La ecuación de equilibrio es:

$$P_c (d/2 + x) + V (d/2 + x) + P_e \cdot x = H_c \cdot h_c + H \cdot h$$

de donde se puede despejar la x:

$$x = [H_c \cdot h_c + H \cdot h - (P_c + V) d/2] / [P_c + V]$$

Ahora se pueden introducir los datos para los cuatros casos posibles: poco aligerado y bastante aligerado, con y sin tejado. Se ha calculado la distancia x y el coeficiente geométrico de seguridad correspondiente. (El coeficiente geométrico de seguridad mide la posición relativa del empuje dentro de la sección y resulta de dividir la mitad del espesor por la distancia del empuje al centro $(d/2)/x$).

Resumimos los resultados en la siguiente tabla

Aligeramiento	con tejado		sin tejado	
	x (m)	coef. seg.	x (m)	coef. seg.
Caso 1) $\beta = 0,6$	0,31	3,23	0,23	4,39
Caso 2) $\beta = 0,6$	0,27	3,75	0,18	5,49

Como puede verse la Lonja con el tejado posee una seguridad suficiente, puesto que el coeficiente geométrico es superior a 3 (sobre la estabilidad de estribos, véase Huerta 2004). La eliminación del tejado supondría una mejora sustancial de la estabilidad.

5. Desmontaje del tejado añadido

El tejado añadido en 1699 sobre la cubierta original de losas y tabiquillos de marés, no afecta la estabilidad de la Lonja. De nuevo la prueba son los más de 300 años que lleva sin producir efectos negativos medibles.

Por supuesto, la retirada del tejado mejora la situación de estabilidad de la Lonja, como se ha demostrado numéricamente en el apartado anterior. Pero el argumento para suprimir el tejado tiene más que ver con la recuperación de la obra original de Sagrera que con ningún problema de estabilidad.

Por otra parte, dada su ligereza, el desmontaje es una tarea sencilla que no requiere de ningún tipo de apeo inferior de las bóvedas. Basta con tomar las siguientes precauciones:

- orden: desmontar primero las tejas, después las vigas y finalmente los machones de marés.
- retirar los elementos a medida que se desmontan, evitando las concentraciones de carga en zonas determinadas de la cubierta.

6. Conclusiones

1. Estabilidad: La Lonja de Palma presenta, en base a los cálculos realizados, una estabilidad muy buena. No podía ser de otra manera en una obra que, tras más de quinientos años, presenta un estado de conservación excelente.
2. Movimientos y grietas: Las mediciones de los desplomes de los muros muestran que los movimientos experimentados por la Lonja son muy pequeños, casi inapreciables. Por supuesto, la estructura rígida de los muros tiene que fracturarse para adaptarse a asientos mínimos del terreno, pero las grietas resultantes son pequeñas, no afectan para nada la seguridad y están estabilizadas.
3. Desmontaje del tejado añadido: El desmontaje del tejado añadido puede realizarse sin ningún problema, tomando las precauciones antes citadas. Por otra parte, la estabilidad de la Lonja mejora notablemente si se desmonta el tejado añadido. Esta operación no es imprescindible, pero es recomendable.

Todo lo cual afirmo y rubrico según mi leal saber y entender en Madrid, a 6 de agosto de de 2008.



Firmado:

Santiago Huerta Fernández

Profesor Titular del Departamento de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

7. Bibliografía

- Abraham, Pol. 1934. *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. Paris: Vicent, Fréal et Cie.
- Bassegoda Nonell, Juan. 1977. Bóvedas medievales a la romana. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Ep.III*. Vol. 43, 8, núm. 782: pp.287-382
- Beranek, W.J. 1988. Understanding of Structures. *Stable-Unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings*. editado por R.M. Lemaire y K. Van Balen, Leuven: Leuven University Press: pp. 29-44.
- Cantarellas Camps, Catalina. 2003. La Lonja de Palma. Un espacio único. *La Lonja de Palma*. F. Climent (ed.). Palma de Mallorca: Govern Balear, Conselleria d'Obres Publiques, Habitatge i Transport: pp. 78-105.
- Climent Guimerá, Federico. 2003. *La Lonja de Palma*. Palma de Mallorca: Conselleria d'Obres Públiques i Transport, Direcció General d'Arquitectura i Habitatge.
- Grassnick, Martin. 1963. *Die Gotischen Wölbungen des Domes zu Xanten und ihre Wiederherstellug nach 1945*. Diss., Fakultät für Architektur der Technischen Hochschule Darmstadt.
- Heyman, Jacques. 1968. On the Rubber Vaults of the Middle Ages and Other Matters. *Gazette des Beaux-Arts*. Vol. 71: pp. 177-188. (Trad. esp. en Cap. 5 de Heyman (1995)).
- Heyman, Jacques. 1983. Chronic Defects in Masonry Vaults: Sabouret's Cracks. *Monumentum*. Vol. 26: pp. 131-141.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Colección de ensayos. Editado por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera / CEHOPU.
- Huerta Fernández, S. y G. López Manzanares. (1996). *Informe sobre la estabilidad de la iglesia de Guimarei*. Departamento de Estructuras de la ETSAM. Dirección Xeral do Patrimonio Cultural. Xunta de Galicia. (Archivo digital UPM: www.ad.upm.es)
- Huerta Fernández, Santiago y Gema López Manzanares. 1997. Stability and consolidation of an ashlar barrel vault with great deformations: the church of Guimarei. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings*. ed. por S. Sánchez-Beitia y C. A. Brebbia. Southampton: Computational Mechanics Publications: pp. 587-96. (Archivo digital UPM: www.ad.upm.es)

Zorn, Eberhard. 1933. *Statische Untersuchung der St Martinskirche in Landshut*. Dissertation: Technischen Hochschule Universität München.

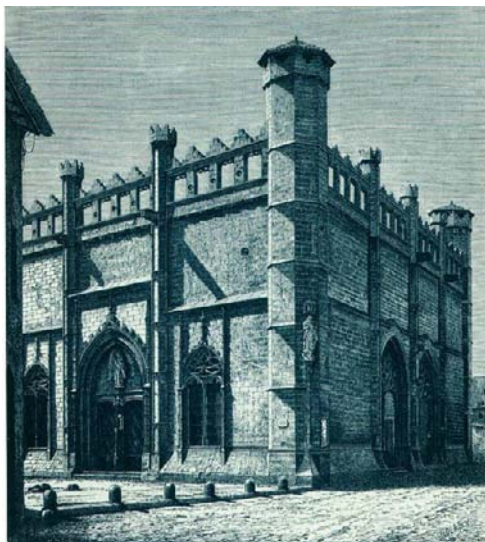
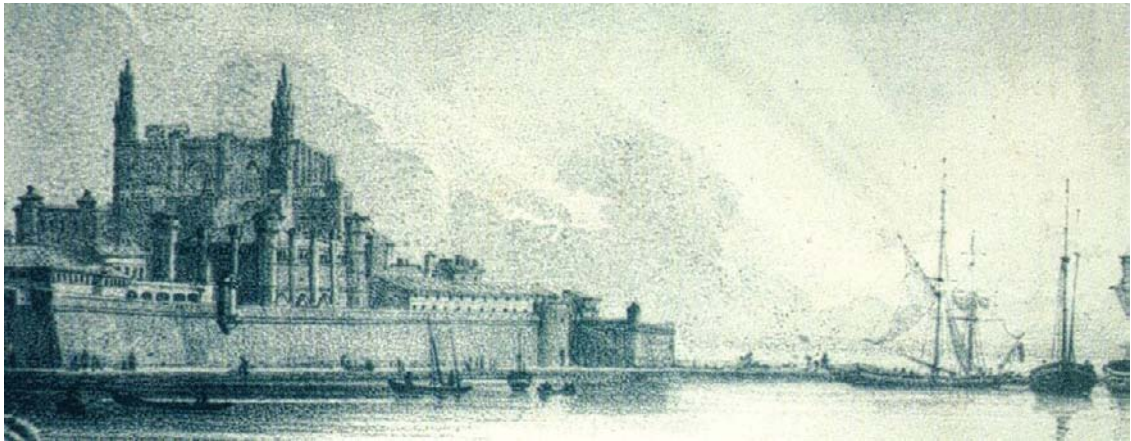
8. Láminas



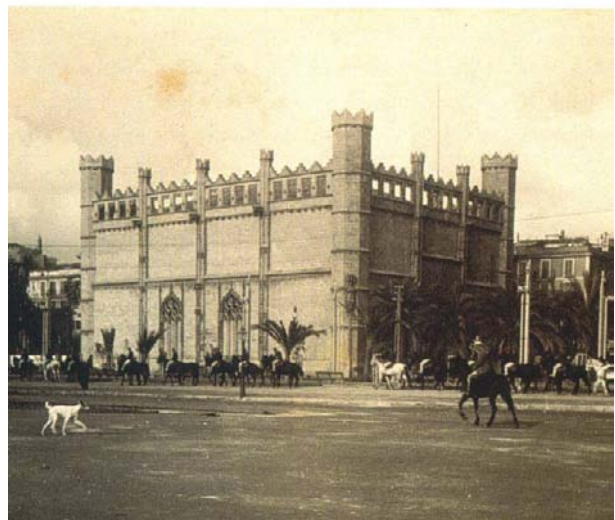
(1840)



(1879)



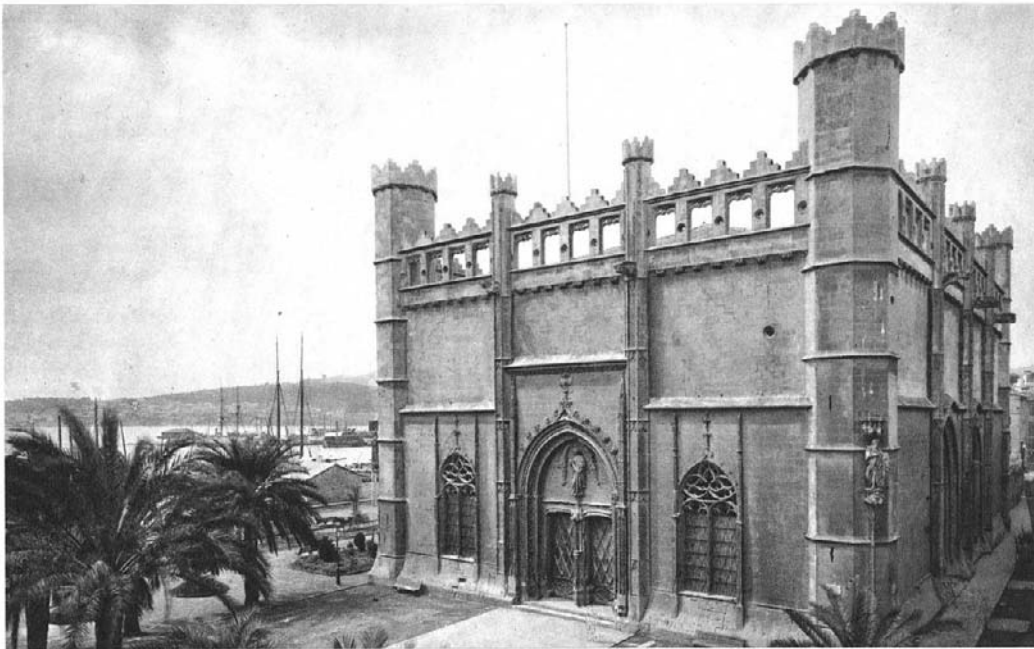
(1882)



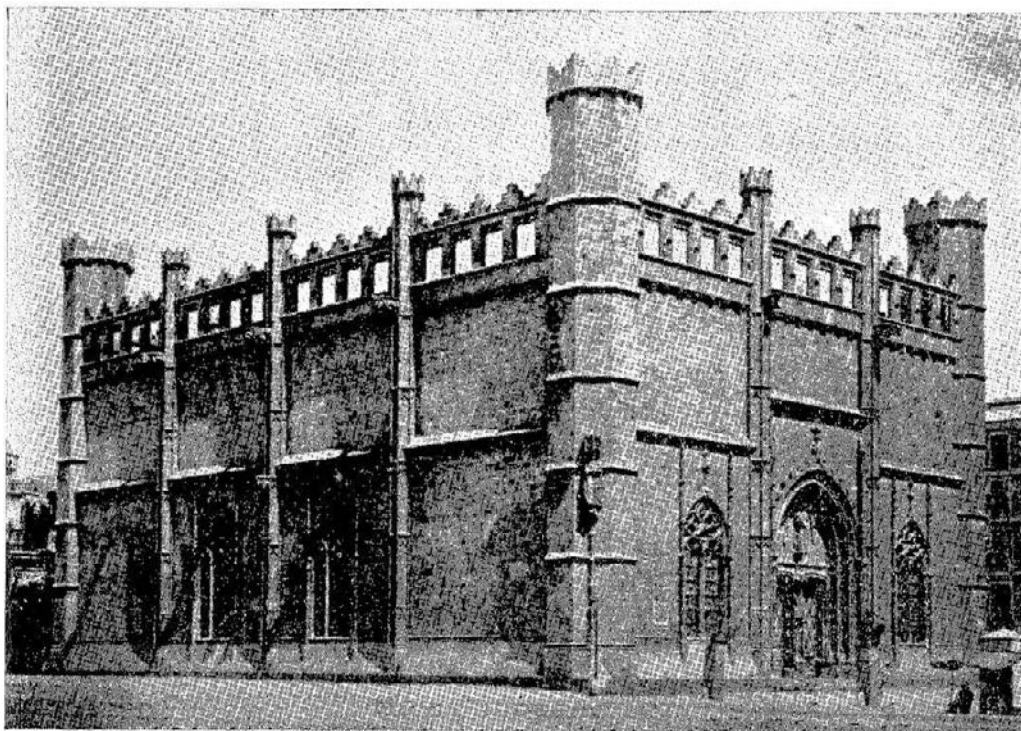
(1910)

Lámina 1

Fotos antiguas de la Lonja de Mallorca (Climent 2003)



(a)



(b)

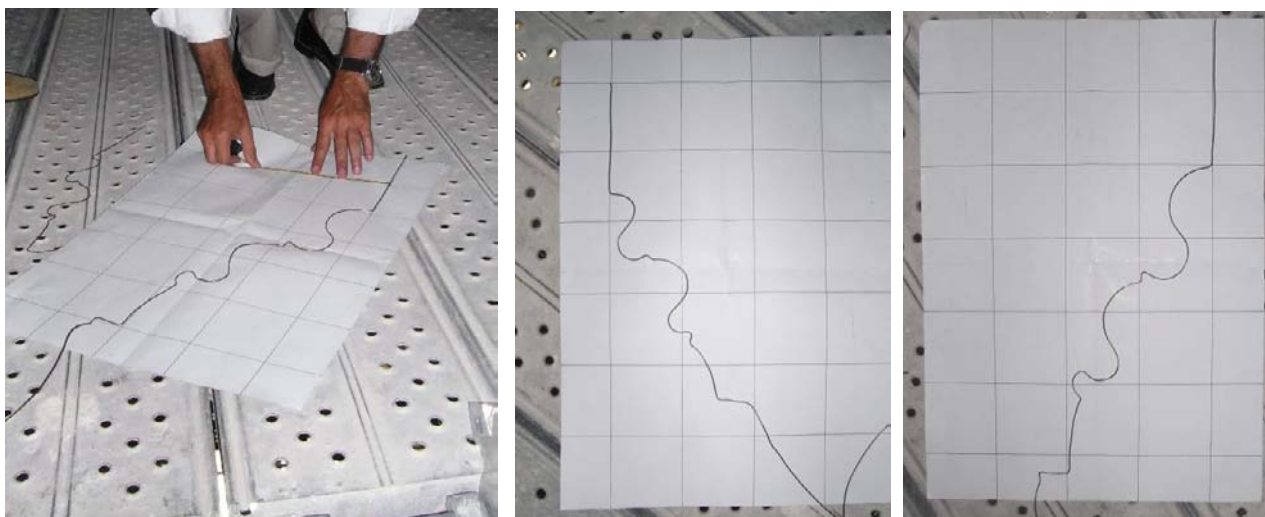
Lámina 2

Vistas exteriores de la Lonja de Mallorca. (a) Torres Balbás (1952)
(b) Jiménez Vidal (1968)

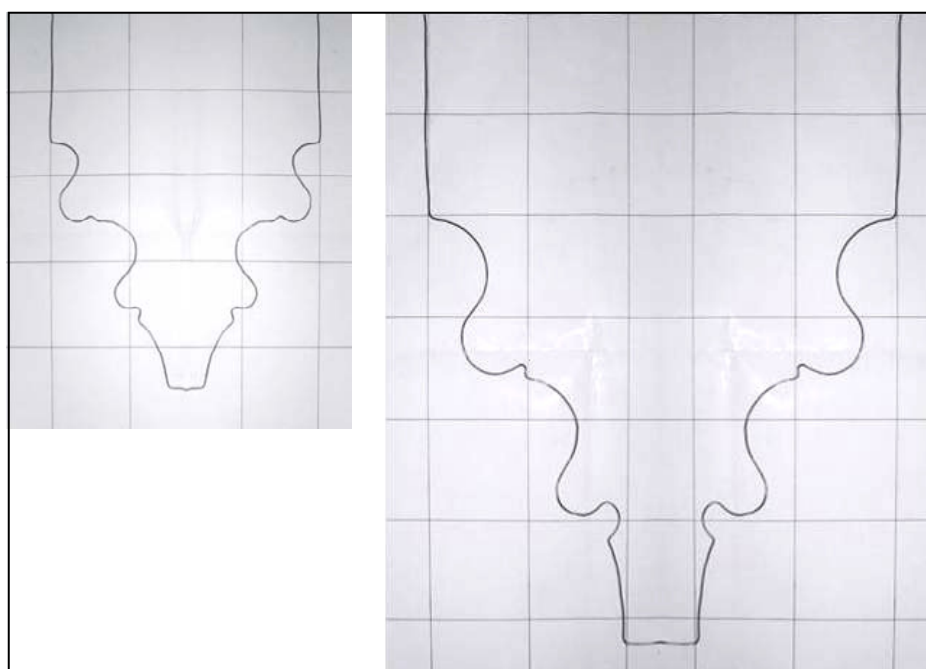


Lámina 3

Detalle de los nervios y plementería. *Arriba*, nótese la deformación del arco Transversal. *Abajo*, nótese la excelente ejecución de nervios y plementería. La clave decorada es de madera.



(a)



(b)

Lámina 4

Empleo de hilo de estaño para “dibujar” de forma aproximada las plantillas de los Nervios. (a) Proceso de colocación del hilo sobre cuadrícula de cuatro pulgadas; (b) Composición de ordenador. Izda, crucero. Dcha. perpiaño



Lámina 5

Bóvedas de la Lonja de Mallorca. Detalle de la bóveda C4 (figura 4 del texto)

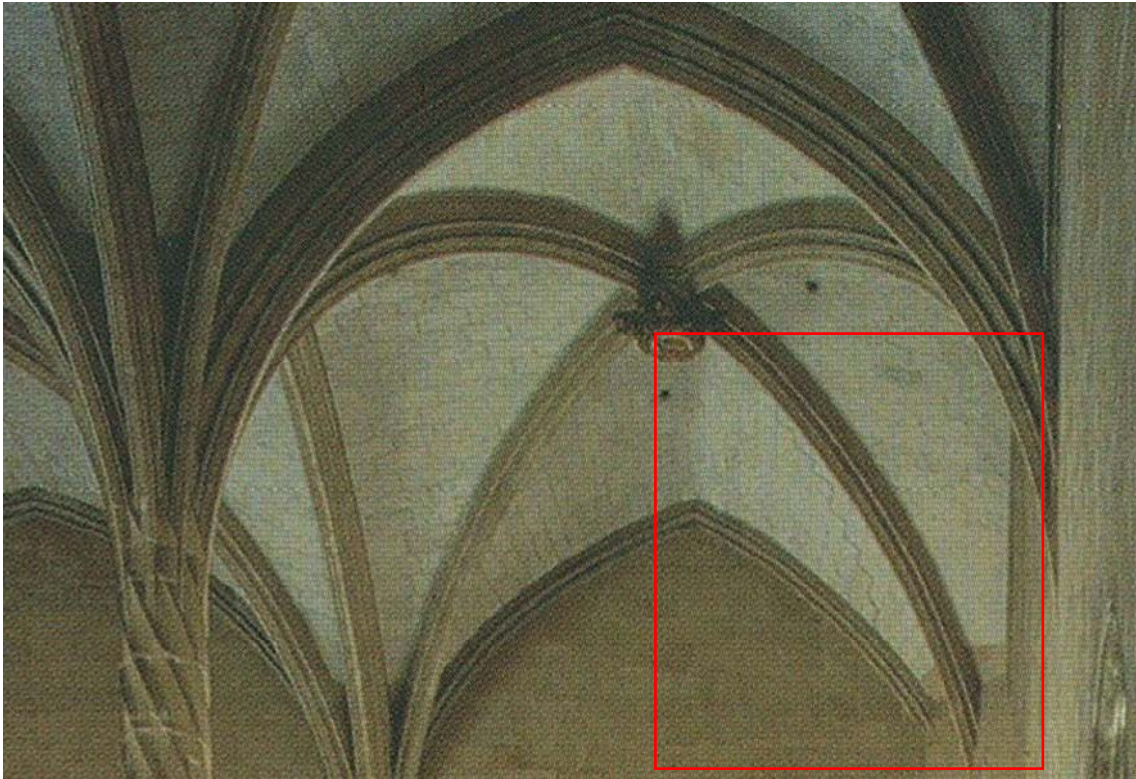
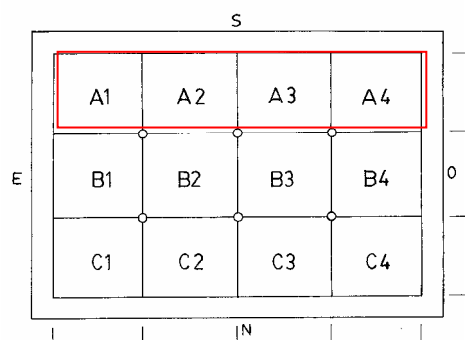


Lámina 6

Detalle de la bóveda C4. *Arriba* foto de G. Ramón en Climent (2003).

Abajo, estado actual. La grieta de la plementería indica la adaptación a un pequeño cedimiento del arranque y no es peligrosa.



A1



A2

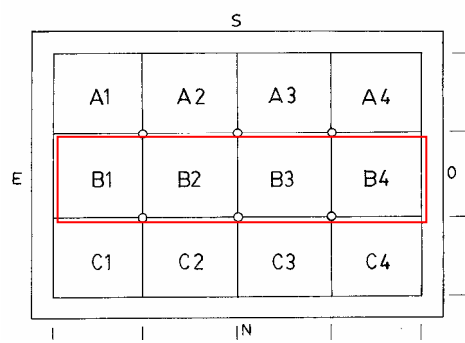


A3



A4

Lámina 7
Bóvedas de la Lonja de Mallorca



B1



B2

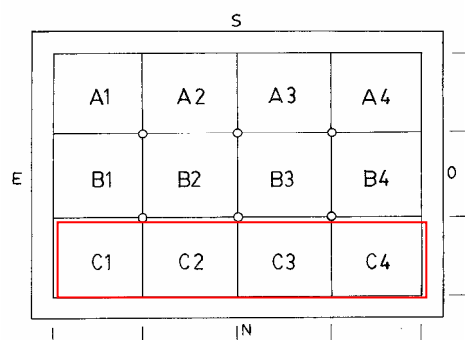


B3

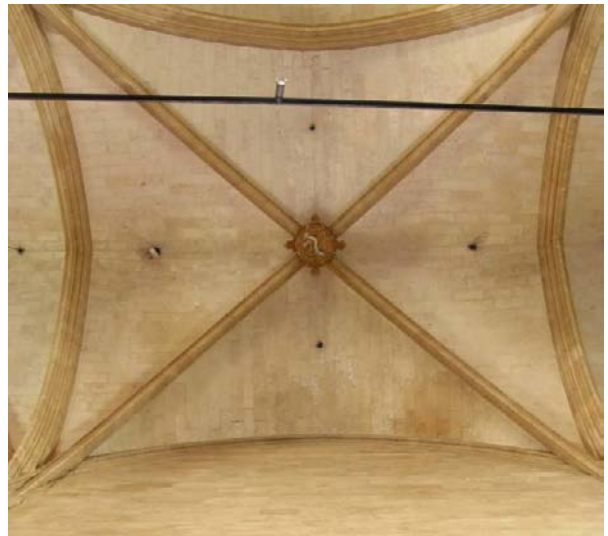


B4

Lámina 8
Bóvedas de la Lonja de Mallorca



C1



C2

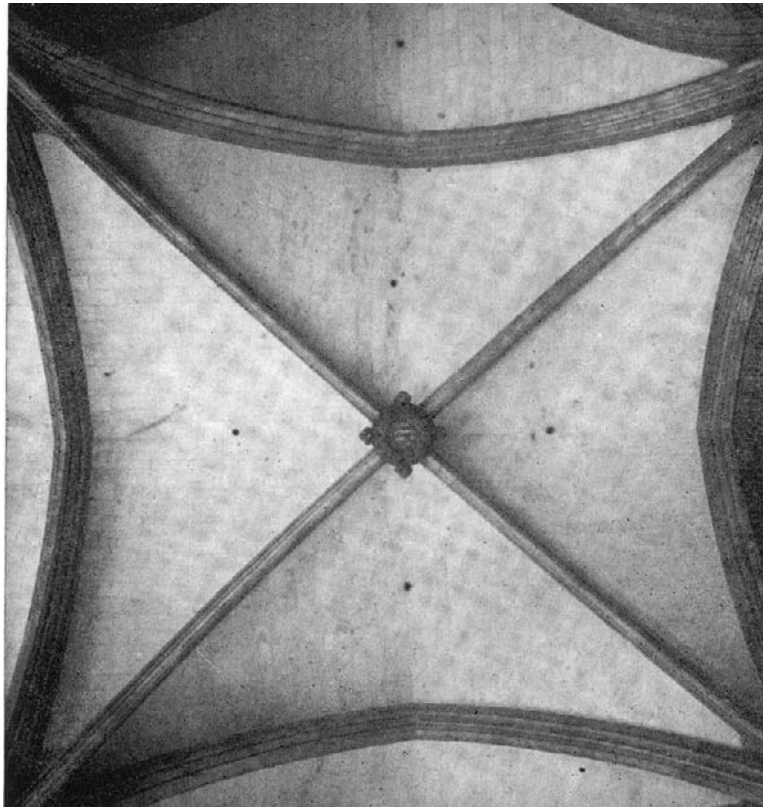


C3



C4

Lámina 9
Bóvedas de la Lonja de Mallorca



(Jiménez
Vidal 1968)



(2008)

Lámina 10

Detalle de la bóveda B3. *Arriba* Jiménez Vidal (1968). *Abajo*, estado actual

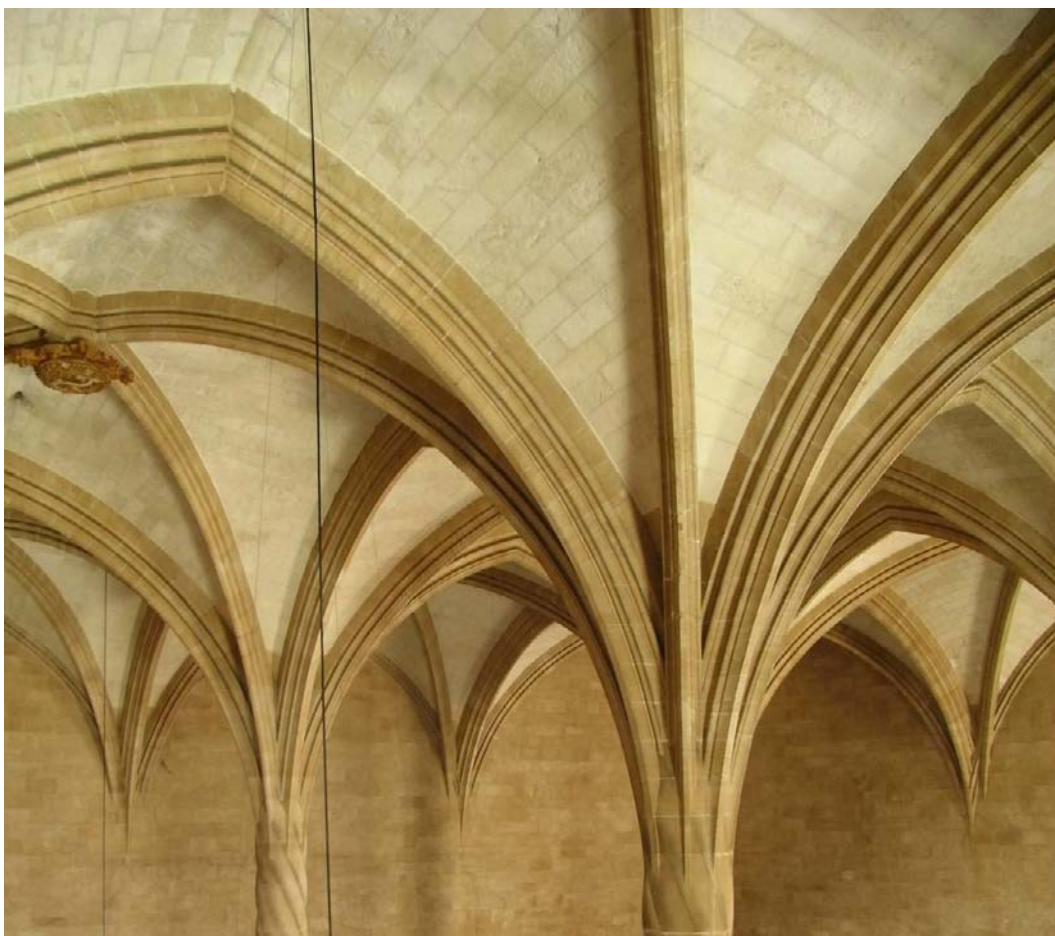


Lámina 11

Bóvedas de la Lonja de Palma. Detalles de nervios y arranques

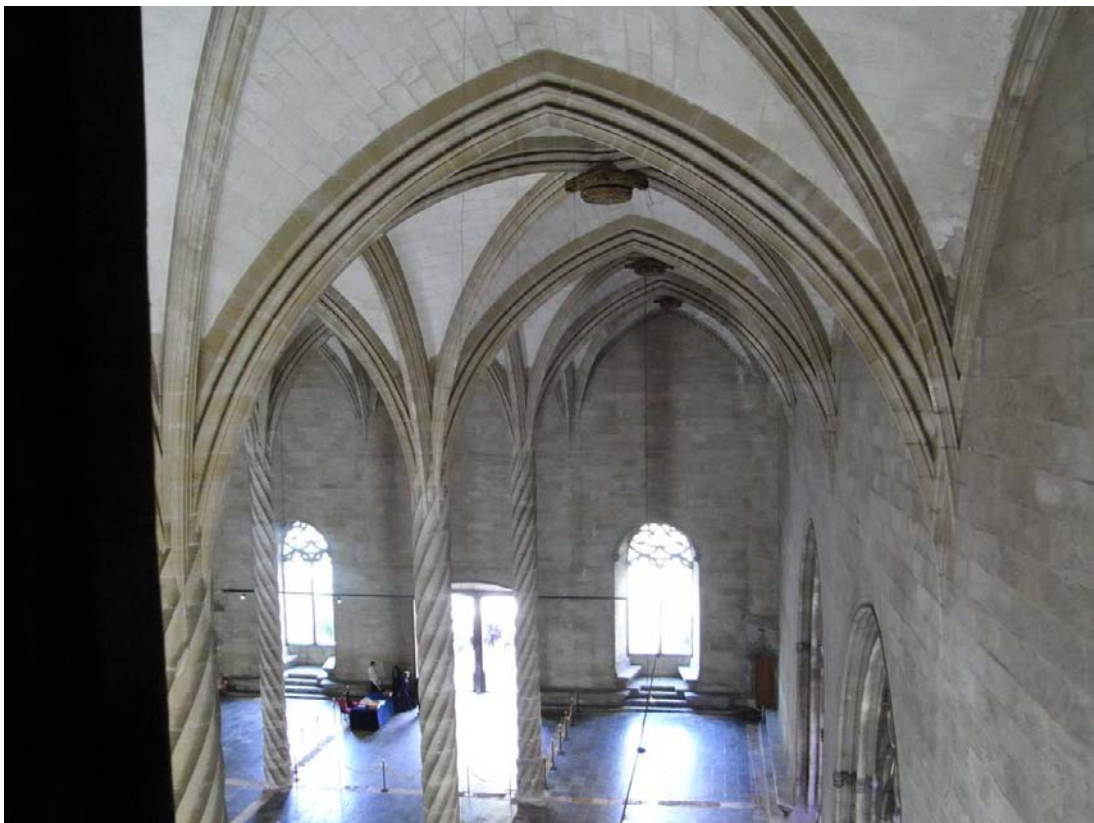
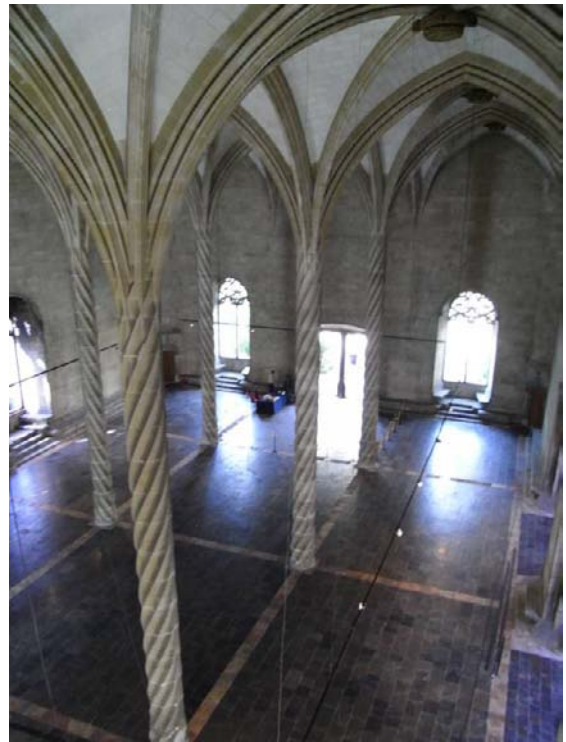


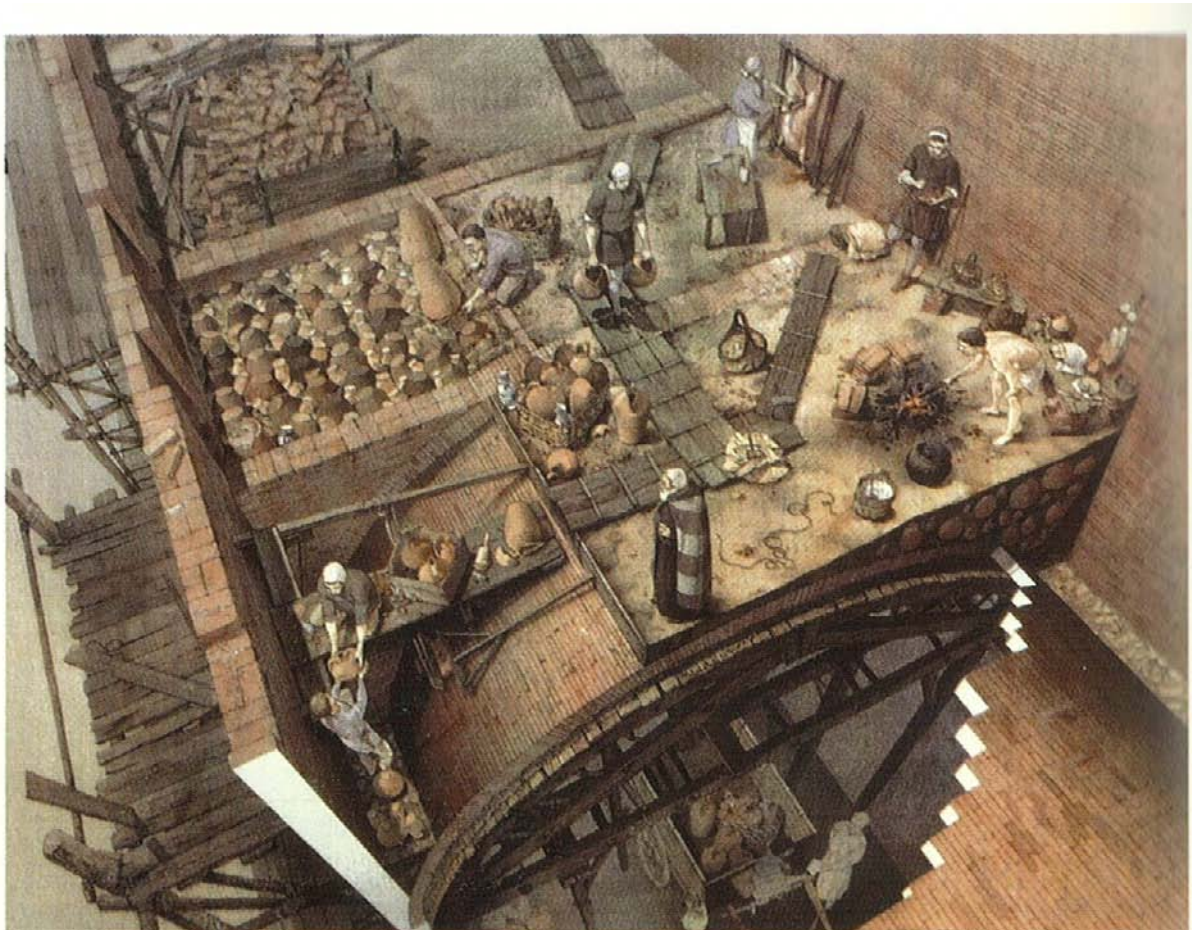
Lámina 12
Vistas interiores de la Lonja de Palma



(a)



(b)



(c)

Lámina 13

(a) Cerámicas de una capilla en Vilafamés, Valencia; (b) Bóveda de Santa María de Alicante; (c) Construcción de una bóveda del convento del Carmine en Siena (Mira y Zaragoza 2003)



Lámina 14

Lonja de Mallorca. Cubierta de tabiquillos y losas de marés, trasdosada de trespol.

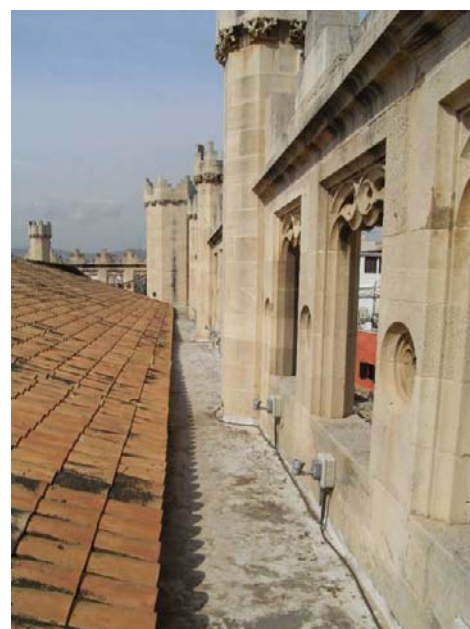


Lámina 15

Vistas del tejado añadido de teja vana sobre listones de madera y vigas metálicas



Lámina 16

Tejado añadido comuesto de un sistema vigas apoyadas en machones de marés



Lámina 17

Detalle del apoyo del tejado sobre el murete de apoyo de bloques de marés